



**Helder Aguiar da
Cunha**

**Ferramentas numéricas para o cálculo da ação do
vento em edifícios segundo o EC1**



**Helder Aguiar da
Cunha**

**Ferramentas numéricas para o cálculo da ação do
vento em edifícios segundo o EC1**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Moraes
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Esta dissertação marca o fim de uma etapa na minha vida e quero portanto deixar aqui os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram em torna-la a melhor possível.

Obrigado ao meu orientador o Professor Miguel Morais por ter acreditado em mim e motivar-me sempre para levar este projeto a bom porto. Sem ele não estaria aqui.

Gostava de agradecer também a todos os professores que tive, tanto no departamento de civil como noutros departamentos, que gostavam de ser professores e de partilhar conhecimento com alunos.

Obrigado ao meu pai e à minha mãe por me terem apoiado sempre, e compreenderem que nem sempre as coisas correram bem, no entanto as boas anulam as más.

Aos meus avós, pela ilusão que depositaram em mim.

À Cátia por estar sempre disponível para mim, por tornar o meu dia-a-dia mais alegre, e por nos últimos anos me ajudar a focar no que realmente interessa.

Aos meus amigos David, Delfina, Diogo, Edgar, João Mário, João Oliveira, Ludovic, Marco e Rui por serem as pessoas que são.

palavras-chave

vento, eurocódigo 1, ação dinâmica, pressão pico, coeficientes pressão, VB.NET, coeficiente de força

resumo

O projeto teve como objetivo o desenvolvimento de um software auxiliar ao cálculo da ação do vento em estruturas abrangidas pelo Eurocódigo 1 (parte 4), a projetistas e alunos.

Foi feita uma pesquisa focada em softwares semelhantes. Desse estudo verificou-se que atualmente nenhum cumpria satisfatoriamente alguns requisitos, tais como usabilidade, foco nas novas normas europeias, nem completos com os vários tipos de estruturas necessários para cálculo.

O software descrito no documento foi chamado de XD-Wind. Foi desenvolvido em linguagem programática VisualBasic .NET, escolhida para de modo a garantir o equilíbrio entre o rigor científico e a apresentação dos resultados de uma forma compreensível a todos os utilizadores que tenham noções mínimas de estruturas isostáticas.

keywords

wind, eurocode 1, design, software, visual basic, pressure coefficient, force coefficient

abstract

The project aimed to the development of a software capable of computing the dynamic actions from the wind on structures covered by the Eurocode 1 (part 4). It can be useful for both designers and education porpuses. A review of existing similar software was performed. From that, it was concluded that none of the available examples were satisfactorily regarding meeting the requirements of usability, neither up to date, or complte enough to assess the different types of structures available for design.

The software was called XD-Wind. It was developed in VisualBasic .NET, a programming language capable of maintainingthe scientific rigor and present the results in a user-friendly and understandable way to users with basic knowledge of isostatic structures.

Índice

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE TABELAS	IV
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. ORGANIZAÇÃO	4
2. ESTADO DA ARTE	6
2.1. EUROCÓDIGO 1-4	7
2.1.1. TERMOS E DEFINIÇÕES	7
2.1.2. ROTINA DE CÁLCULO	8
2.1.3. COEFICIENTES DE PRESSÃO OU DE FORÇA	15
2.1.3.1. EDIFÍCIOS	15
2.1.3.2. ESTRUTURAS ISOLADAS	23
2.1.3.3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS	29
2.1.3.4. ESTRUTURAS TRELIÇADAS	37
2.1.3.5. ESBELTEZA EFETIVA E COEFICIENTE DE EFEITOS DE EXTREMIDADE	44
2.1.3.6. BANDEIRAS	46
2.2. ANÁLISES DE FERRAMENTAS EXISTENTES	47
3. PROGRAMA XD-WIND	51
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	51
3.2. MODO DE UTILIZAÇÃO	52
3.1.1. EDIFÍCIOS	53
3.1.2. ESTRUTURAS ISOLADAS	56
3.1.3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS	60
3.1.4. ESTRUTURAS TRELIÇADAS	60
3.1.5. BANDEIRAS	62
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	65
4.1. CONCLUSÕES	65
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	65
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

Índice de Figuras

Figura 1 – Torre da catedral de Lichfield, Staffordshire, Inglaterra	1
Figura 2 – Colapso do vão central da ponte de Tacoma Narrows, Tacoma, WA, Estados Unidos	3
Figura 3 – Análise da ação do vento sob estruturas através de ferramenta de cálculo CFD, Cyclone	4
Figura 4 – Coeficientes de pressão interior no caso de aberturas uniformemente distribuídas (LNEC 2010)	11
Figura 5 – Ambiente gráfico do software <i>WebPlotDigitizer</i>	12
Figura 6 – Menu de calibração dos eixos do software <i>WebPlotDigitizer</i>	12
Figura 7 – Menu de calibração dos eixos do software <i>WebPlotDigitizer</i>	12
Figura 8 – Altura de referencia z_e em função de h e b , e correspondente perfil de pressão dinâmica (LNEC 2010)	15
Figura 9 – Zonas em paredes verticais (LNEC 2010)	16
Figura 10 - Zonas em coberturas em terraço (LNEC 2010)	17
Figura 11 – Zonas em coberturas de uma vertente (LNEC 2010)	18
Figura 12 – Zonas em coberturas de duas vertentes (LNEC 2010)	20
Figura 13 – Zonas em coberturas de 4 vertentes (LNEC 2010)	21
Figura 14 – Coeficientes de pressão em coberturas múltiplas (LNEC 2010)	22
Figura 15 – Coeficientes de pressão externa para coberturas em abobada e cúpulas(LNEC 2010)	23
Figura 16 – Obstrução por baixo de uma cobertura de 2 vertentes (LNEC 2010)	24
Figura 17 – Localizações possíveis para a força global sobre coberturas isoladas de uma vertente (LNEC 2010)	25
Figura 18 – Localizações possíveis para a força global sobre coberturas isoladas de duas vertentes (LNEC 2010)	26
Figura 19 – Coberturas isoladas múltiplas(LNEC 2010)	26
Figura 20 – Zonas em paredes verticais (LNEC 2010)	27
Figura 21 – Painéis de sinalização (LNEC 2010)	29
Figura 22 – Elementos estruturais de seção com arestas vivas (LNEC 2010)	31
Figura 23 – Circunferência delimitadora de elementos estruturais de seção poligonal regular (LNEC 2010)	31
Figura 24 – Distribuição de pressões sobre cilindros de base circular (LNEC 2010)	33
Figura 25 – Representação do coeficiente k (LNEC 2010)	35
Figura 26 – Distância z_g para cilindros de base circular (LNEC 2010)	35
Figura 27 – Distância z_g para esferas (LNEC 2010)	37
Figura 28 – Áreas A e A_c para estruturas treliçadas (LNEC 2010)	38
Figura 29 – Folha de cálculo da Yourspreadsheets	47
Figura 30 - Folha de cálculo do Eng Domenico Leone	48
Figura 31 – Mapa de seleção de zona e tipo de rugosidade da aplicação Opterecenja	49
Figura 32 – Resultados obtidos através da aplicação Opterecenja	49

Figura 33 – Entrada de parâmetros para o cálculo da ação do vento na aplicação Portal+	50
Figura 34 – Ação de sucção causada pelo vento num pilar do pórtico na aplicação Portal+	50
Figura 35 – Janela introdutória do XD-Wind.....	52
Figura 36 a) e b) – Janela de localização do XD-Wind	53
Figura 37 – Janela “edifícios” do XD-Wind	54
Figura 38 – Janela “edifícios duas vertentes exterior” do XD-Wind	54
Figura 39 – Duas das possíveis representações do XD-Wind	55
Figura 40 – Janela “edifícios duas vertentes interior” do XD-Wind	55
Figura 42 – Janela “edifícios duas vertentes exterior 0º” do XD-Wind	56
Figura 43 – Janela “Estruturas isoladas” do XD-Wind.....	57
Figura 44 – Janela “Cobertura isolada com duas vertentes forças globais” do XD-Wind	57
Figura 45 – Janela “Cobertura isolada com duas vertentes coeficientes de pressão” do XD-Wind	58
Figura 46 – Janela “Parede isolada” do XD-Wind	59
Figura 47 – Janela “Parede isolada com pano de esquina” do XD-Wind	59
Figura 48 – Janela “Painel de sinalização” do XD-Wind	60
Figura 49 – Janela “Estruturas treliçadas” do XD-Wind	61
Figura 50 – Janela “Coeficiente de efeitos de extremidade” do XD-Wind	62
Figura 51 – Janela “Bandeiras” do XD-Wind	62
Figura 52 – Ação do vento numa bandeira no programa XD-Wind	63

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Categoria de terreno e respetivos parâmetros (LNEC 2010)	9
Tabela 2 – Análise do gráfico 1	13
Tabela 3 – Coeficientes de atrito c_{fr} para paredes platibandas e coberturas (LNEC 2010).....	14
Tabela 4 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta retangular (LNEC 2010).....	16
Tabela 5 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas em terraço(LNEC 2010)	17
Tabela 6 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas de uma vertente para as direções do vento 0°, 90° e 180°(LNEC 2010).....	19
Tabela 7 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas de quatro vertentes (LNEC 2010)	21
Tabela 8 - Valores recomendados dos coeficientes de força para coberturas isolada de uma vertente (LNEC 2010).....	24
Tabela 9 - Valores recomendados dos coeficientes de força para coberturas isoladas de duas vertentes(LNEC 2010)	25
Tabela 10 – Coeficientes de força c_{f0} para paredes isoladas, platibandas, e vedações (LNEC 2010).....	27
Tabela 11 – Representação analítica do gráfico para factor de proteção (LNEC 2010).....	28
Tabela 12 – Representação analítica do gráfico para coeficiente de força para seções retangulares (LNEC 2010).....	30
Tabela 13 – Representação analítica do gráfico para coeficiente de redução para cantos arredondados(LNEC 2010)	30
Tabela 14 – Coeficientes de força para elementos de seção poligonal regular (LNEC 2010)	32
Tabela 15 – Parâmetros para a distribuição de pressões sobre cilindros de de base circular em função do número de Reynolds (LNEC 2010).....	33
Tabela 16 – Rugosidade equivalente para vários tipos de materiais (LNEC 2010)	33
Tabela 17 – Representação analítica do gráfico para coeficiente de força para seções retangulares (LNEC 2010).....	34
Tabela 18 – Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para esferas (LNEC 2010)	36
Tabela 19 – Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas planas constituídas de perfis angulosos (LNEC 2010)...	38
Tabela 20 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais constituídas de perfis angulosos ° (LNEC 2010)	39
Tabela 21 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas planas constituídas de perfis circulares com o vento a atuar paralelamente à estrutura ° (LNEC 2010).....	40

Tabela 22 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas planas constituídas de perfis circulares com o vento a atuar perpendicularmente à estrutura ° (LNEC 2010)	41
Tabela 23 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais triangulares constituídas de perfis circulares com o vento a atuar numa aresta (LNEC 2010)	41
Tabela 24 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais triangulares constituídas de perfis circulares com o vento a atuar num vértice (LNEC 2010).....	42
Tabela 25 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais quadrangular constituídas de perfis circulares com o vento a atuar num vértice (LNEC 2010).....	42
Tabela 26 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais quadrangular constituídas de perfis circulares com o vento a atuar numa aresta(LNEC 2010)	43
Tabela 27 – Possíveis casos de esbelteza efetiva (LNEC 2010)	44
Tabela 28 – Representação analítica do gráfico para coeficientes de efeitos de extremidade (LNEC 2010)	45
Tabela 29 – Coeficientes de força para bandeiras (LNEC 2010)	46
Tabela 30 – Diferenças de operadores entre C# e VB.NET	51

Índice de Abreviaturas

A – área; soma das áreas das projeções no plano perpendicular ao vento de todos os elementos e chapas de *gousset* da face: $A = \sum_i b_i \cdot l_i + \sum_k A_{gk}$,

A_c – área limitada pelo contorno da face em projeção normal à mesma com $b = d$ ($A_c = d \cdot l$),

A_{fr} – área de superfície exterior paralela ao vento

A_{gk} – área da chapa de *gousset* k

A_{ref} – área de referência da superfície individual

b – ordenada na origem; diâmetro

b_i, l_i – Largura/comprimento, respetivamente, do elemento i projetado perpendicularmente à face

c_f – coeficiente de força

CFD – Dinâmica Computacional de Flúidos

$c_{f,0}$ – coeficiente de força para elementos de secção retangular com arestas vivas e sem escoamento livre

c_{fr} – coeficiente de atrito

c_o – coeficiente de orografia

$c_{p,0}$ – coeficiente de pressão exterior sem livre escoamento em torno das extremidades,

c_{pe} – coeficiente de pressão exterior

c_{pi} – coeficiente de pressão interior

c_r - coeficiente de rugosidade

$c_s c_d$ – coeficiente estrutural

d – largura da treliça

e – excentricidade de uma força

EC1 – Eurocódigo 1

F_w – força resultante exercida pelo vento

F_{fr} – força de atrito resultante

h – altura da construção

I_v - intensidade de turbulência

k – rugosidade equivalente

l – comprimento do elemento estrutural; comprimento da treliça

m_f – massa por unidade de comprimento

q_p – pressão dinâmica de pico

RSAEEP – Regulamento de Segurança e Ações em Estruturas de Edifícios e Pontes

RSEP – Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes

v_b - valor de referência da velocidade do vento

v_m – velocidade média do vento

w – pressão exercida pelo vento

x – abcissa

y – ordenada

z_e – altura de referência para a pressão exterior (interior) exercida pelo vento

z_0 – comprimento de rugosidade

z_g – distância entre o componente considerado e o solo, ou um obstáculo

z_{\min} – altura mínima

φ – índice de cheios; obstrução em coberturas isoladas

μ – índice de aberturas; permeabilidade de uma superfície

ν – viscosidade cinemática do ar ($15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

ρ – massa volúmica do ar ($1,25 \text{ kg/m}^3$)

σ_v – desvio padrão da turbulência

ψ_r – coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados, este valor depende do número de Reynolds

ψ_λ – coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento

$\psi_{\lambda\alpha}$ – coeficiente para efeitos de extremidade

ψ_s – coeficiente de proteção para paredes e vedações

Índices

e – exterior

i – interior

ref – referência

x – direção do vento

y – direção transversal ao vento

y – direção vertical

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

Ao longo dos anos estruturas naturais como as árvores têm se adaptado à ação do vento, ação essa que salvo casos como as velas dos barcos, os moinhos é maioritariamente desfavorável (Riera and Davenport 1998). O estudo da ação do vento também foi evoluindo e Baker divide-o arbitrariamente em 5 períodos (Baker 2007):

- Período até ao início da idade Moderna (até 1750 d.C.)

Embora seja um período muito abrangente a construção de estruturas assenta sempre no conhecimento empírico e nas tradições (Aynsley, Melbourne, and Vickery 1977), desta forma o estilo das construções varia significativamente de local para local. Os episódios de tempestades estavam ligados à ira dos Deuses não havendo portanto qualquer noção de ação de cálculo.

Nos séculos XII e XIII por toda a Europa surgiu o desejo de expressar o culto a Deus na arquitetura o que levou a que as igrejas fossem cada vez maiores e mais altas. A ação do vento é agravada comparativamente a estruturas mais baixas, no entanto as técnicas de construção também evoluem. A mais significativa alteração foi a geometria das torres, que passa de pirâmides de quatro faces a polígonos com mais arestas e cada vez menos vivas, reduzindo desta forma a carga do vento sobre elas (Figura 1).

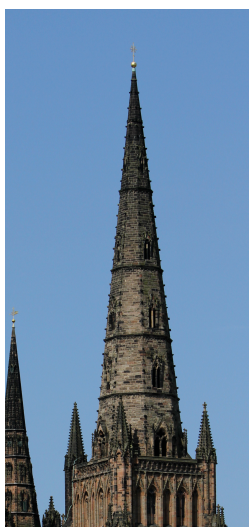


Figura 1 – Torre da catedral de Lichfield, Staffordshire, Inglaterra

- Período empírico (1750-1900)

Este período caracteriza-se indubitavelmente pela revolução industrial. Com a necessidade de expandir as vias de comunicação ferroviárias começam a surgir as primeiras pontes com grandes vãos. O efeito do vento nessas estruturas tornaria-se significativo e derivado deste foram colapsos como o da ponte Tay em 1879. A ação de cálculo do vento surge principalmente com a análise de colapsos.

A nível científico neste período destacam-se os trabalhos de Euler, Newton, Bernoulli e Navier na hidrodinâmica, e as experiências feitas por Baker que mediu a força do vento em chapas rectangulares, chegando à conclusão que a força do vento sobre estas é proporcional à sua área.

- Período da democratização (1900-1960)

No início do século XX a revolução industrial começa a influenciar todas as envolventes da sociedade e muito fortemente a Engenharia Militar. Muitas das descobertas tecnológicas deste século aconteceram sobre a alçada militar, por exemplo foram feitos estudos sobre a dispersão atmosférica em Porton Down no Reino Unido meramente para entender como funcionariam os ataques químicos (Meroney 1999). Nesta conjuntura começam a formar-se cada vez mais universidades onde algumas delas começam a estudar ativamente a ciência do vento.

A 7 de Novembro de 1940 dá-se o colapso do vão central da ponte de Tacoma Narrows (Figura 2), na altura surgiram várias teorias sobre qual seria a principal causa mas não houve consenso. Contudo este colapso sensibilizou os engenheiros para a necessidade de considerar a estabilidade aerodinâmica em estruturas desta envergadura, até então os tabuleiros eram rígidos (e portanto altos) de forma a suportar as forças (Biezma and Schanack 2007). Também derivado deste colapso foi o estudo de Fraquaharson em 1949 que permitiu estabelecer uma série de regras e métodos a ter em conta em ensaios à escala com túneis de vento.

Surgem os primeiros regulamentos que permitem calcular a ação de efeitos ambientais. Em 1961 surge em Portugal o Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes (RSEP).



Figura 2 – Colapso do vão central da ponte de Tacoma Narrows, Tacoma, WA, Estados Unidos

- Período do desenvolvimento (1960-1980)

Nestas duas décadas a engenharia do vento começa a ser encarada como uma disciplina que estuda os efeitos do vento em edifícios altos e/ou baixos, pontes, mastros e torres.

É desenvolvido o túnel de vento de camada limite e são feitos ensaios à escala real, como por exemplo o da casa de Aylesbury (Eaton and Mayne 1975).

Começam a ser desenvolvidos mais e mais detalhados regulamentos pelas entidades competentes de cada país, e alguns como o UK code são atualizados.

- Período atual (1980-presente)

Embora nas anteriores décadas tenham surgido avanços da área da informática é neste período que se dá o boom tecnológico e com isso torna-se possível a obtenção e processamento de altas quantidades de dados. É criada a mecânica dos fluídos computacionais (CFD) (Figura 3) que se tornou uma das ferramentas fundamentais na investigação da engenharia do vento nas últimas décadas.

Começam a aparecer os primeiros efeitos climáticos provocados pela ação humana e tanto nas zonas temperadas como nas tropicais há um aparente aumento de catástrofes relacionados com o vento (Baker 2007). Contudo nas estruturas mais recentes, que foram projetadas de acordo com os regulamentos existentes, o dano estrutural observado é praticamente nulo.

Na Europa surge o Eurocódigo 1 que aborda o cálculo da ação do vento (LNEC 2010).

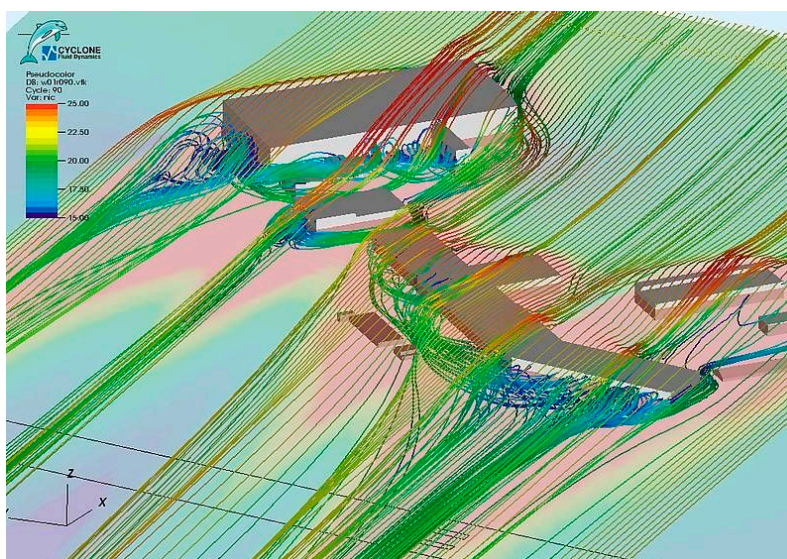


Figura 3 – Análise da ação do vento sob estruturas através de ferramenta de cálculo CFD, Cyclone

Este é um período claramente marcado pela massificação das tecnologias, a possibilidade de resolver problemas complexos em questões de segundos torna as empresas progressivamente mais otimizadas, eficientes, e por sua vez competitivas.

Num mundo onde o download de *apps* está na ordem dos bilhões por ano (Sharma 2010) e onde o conhecimento de linguagens de código para além de ser uma competência importantíssima, começa cada vez mais cedo (Kafai and Burke 2013) torna-se evidente que o futuro é o desenvolvimento de aplicações que simplifiquem tanto o nosso *work-flow* como o nosso dia-a-dia.

Dada esta envolvente esta dissertação abordará o desenvolvimento de um software que permita o cálculo da ação do vento em estruturas.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um software que permita o cálculo da ação do vento segundo o Eurocódigo 1-4 seguindo sempre que necessário o Anexo Nacional. Será uma ferramenta onde o *ease-of-use* estará em primeiro plano de forma a que estudantes e projetistas com os mínimos conhecimentos informáticos tenham uma ferramenta de suporte que os ajude a calcular rápida e corretamente a ação do vento nas suas estruturas.

1.3. Organização

Este documento está organizado em 4 capítulos sendo o primeiro uma breve abordagem à evolução ao longo do tempo da importância dada ao vento nas construções.

O segundo capítulo é um estado da arte onde serão expostas as rotinas de cálculo seguindo o EC1, algumas das adaptações necessárias para o transpor para o programa e uma análise aos softwares existentes que calculam a ação do vento segundo o EC1.

No terceiro capítulo explica-se o porquê da linguagem de escolhida para o desenvolvimento do programa e alguns conceitos sobre a mesma. Também é mostrado o ambiente gráfico do software XD-Wind acompanhado de um tutorial sobre como usa-lo.

No quarto e último capítulo encontram-se as considerações finais sobre o processo de criação desta dissertação assim como planos para a continuação do desenvolvimento do programa.

2. Estado da arte

2.1. Eurocódigo 1-4

A parte 4 do Eurocódigo 1 aborda o cálculo das ações do vento para o projeto estrutural de:

- edifícios e outras obras de engenharia civil com alturas até 200m;
- pontes em que nenhum tramo tenha um vão superior a 200m;

no entanto, excluem-se:

- mastros espiados e torres em treliça (ver EN 1993-3-1);
- postes de iluminação (ver EN 40);

e não são fornecidas orientações relativamente a:

- vibrações por torção;
- vibrações de tabuleiros devidas à turbulência transversal do vento;
- ações do vento em pontes suspensas ou de tirantes;
- vibrações em que é necessário considerar outros modos para além do fundamental;

(LNEC 2010).

2.1.1. Termos e definições

Valor básico da velocidade de referência do vento – Representa a velocidade média do vento em períodos de 10 minutos, a probabilidade anual deste valor ser excedido é aproximadamente 0.02. Para uma construção com um período de retorno de 50 anos a probabilidade deste valor ser excedido uma vez é cerca de 64%

Valor de referência da velocidade do vento – Este parâmetro refere-se ao valor básico da velocidade de referência do vento alterado para ter em conta a direção do vento, c_{dir} , e a estação do ano, c_{seas} . Os efeitos sazonais são apenas importantes para estruturas temporárias (N. Cook 2007). Em Portugal este parâmetro é por norma ignorado sendo o seu valor recomendado pelo Anexo Nacional igual a 1.

Velocidade média do vento – é o valor de referência da velocidade do vento, a uma dada altura acima do solo, modificado para ter em conta os efeitos da rugosidade do terreno e da orografia. É o valor usado para o cálculo das ações do vento (LNEC 2010).

Coeficiente de pressão – fornece uma representação de como as pressões exercidas pelo vento sobre a estrutura se distribuem. Pode ser referente ao exterior, c_{pe} , e ao interior, c_{pi} , os coeficientes externos só dependem da forma da estrutura enquanto que

os internos dependem de como as pressões externas penetram o interior da estrutura (N. Cook 2007).

Os coeficientes externos repartem-se ainda em coeficientes globais, $c_{pe,10}$, e coeficientes locais, $c_{pe,1}$, os primeiros correspondem a superfícies com área superior a 10m^2 e os últimos a áreas iguais ou interiores a 1m^2 , para superfícies compreendidas entre essas áreas podem fazer-se interpolações lineares

Coeficiente de força – representa a força global exercida pelo vento sobre uma estrutura, componente, ou elemento estrutural, no seu todo. Podem ser especificados em dois eixos, um com o vento paralelo ao comprimento da estrutura, representando a força de atrito, e outro perpendicular ao comprimento da estrutura representando a ação do vento propriamente dita (N. Cook 2007).

2.1.2. Rotina de cálculo

O cálculo da ação do vento segundo o Eurocódigo 1 passa essencialmente pelo cálculo de três parâmetros:

1. Pressão dinâmica de pico q_p ;
2. Coeficientes de força ou de pressão;
3. Forças exercidas pelo vento sobre as construções.

Para o cálculo da pressão dinâmica de pico é preciso conhecer os seguintes dados:

- coeficiente de orografia $c_0(z)$;
- coeficiente de rugosidade $c_r(z)$;
- valor de referência da velocidade do vento v_b ;
- velocidade média do vento v_m ;
- intensidade de turbulência $I_v(z)$.

O coeficiente de orografia, $c_0(z)$, geralmente é considerado igual a 1, excepto quando devido à orografia a velocidade do vento seja majorada significativamente. Nesse caso o cálculo é feito através do ponto A.3 do Anexo Nacional.

Para o cálculo do coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, é necessário saber o tipo de terreno onde será construída a estrutura.

Tabela 1 - Categoria de terreno e respetivos parâmetros (LNEC 2010)

Categoria do terreno	Z_0 [m]	z_{min} [m]
I – Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II – Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de pelo menos 20 vezes a sua altura	0,05	3
III – Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV – Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m	1,0	15

Sabendo a altura da construção acima do solo (z) é possível calcular o coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, através das expressões:

Para $z_{min} \leq z \leq z_{max}$

$$c_r = k_r \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right) \quad (1)$$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (2)$$

em que:

$Z_{0,II}$ 0,05 m

Z_0 depende da categoria de terreno, ver Tabela 1

Para $z \leq z_{min}$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad (3)$$

A velocidade de referência de base do vento, v_b , depende tal como no RSAEEP da zona da obra, as condições que as definem são as mesmas que no RSAEEP.

- Zona A – A generalidade do território, exceto regiões pertencentes à Zona B;
- Zona B – Açores e Madeira; Faixa costeira com 5km de largura; locais com altitude superior a 600m; Locais que mesmo situados na Zona A tenham exposição ao vento muito desfavorável;

Assim sendo as velocidades de referência de base do vento, v_b , são:

- Zona A = 27 m/s;
- Zona B = 30 m/s.

A velocidade média, v_m , pode então ser calculada por:

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \quad (4)$$

O seguinte parâmetro a determinar é a intensidade de turbulência, $I_v(z)$, que é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento.

$$\sigma_v = k_r \times v_b \times k_I \quad (5)$$

em que:

k_I – Coeficiente de turbulência, o valor recomendado pela norma é 1,0.

Para $z_{min} \leq z \leq z_{max}$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \times \ln(z/z_0)} \quad (6)$$

Para $z \leq z_{min}$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad (7)$$

A pressão dinâmica de pico pode ser calculada por:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (8)$$

em que:

ρ – Massa volúmica do ar (1,25kg/m³)

O próximo passo é o cálculo da pressão exercida pelo vento em superfícies.

Para a pressão exercida pelo vento em superfícies exteriores de uma construção, w_e , deve usar-se a expressão:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (9)$$

em que:

c_{pe} – Coeficiente de pressão exterior

Tal como no RSAEEP a convenção para as pressões efetuadas pelo vento é:

Sinal positivo (+) – pressão exercida sobre a superfície;

Sinal negativo (-) – pressão que causa sucção à superfície.

Os coeficientes de pressão exterior e de força serão abordados no ponto 2.3. deste documento.

De forma a obter a pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores de uma construção deve usar-se a expressão:

$$w_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (10)$$

em que:

c_{pi} – Coeficiente de pressão interior

Para o cálculo do coeficiente de pressão interior, c_{pi} , deve saber-se qual é a face predominante do edifício. Considera-se predominante a face cuja área das aberturas é pelo menos o dobro da área das aberturas nas restantes faces do edifício.

Quando a área das aberturas na face predominante é igual ao dobro das restantes faces:

$$c_{pi} = 0,75 \times c_{pe} \quad (11)$$

Quando a área das aberturas na face predominante é igual a, pelo menos, o triplo das restantes faces:

$$c_{pi} = 0,90 \times c_{pe} \quad (12)$$

em que c_{pe} é o valor do coeficiente de pressão exterior ao nível das aberturas na face predominante.

Quando o rácio entre a área das aberturas na face predominante e nas restantes faces, pode ser efetuada uma interpolação linear para o cálculo de c_{pi} .

No caso de edifícios sem face predominante poderá usar-se o seguinte gráfico.

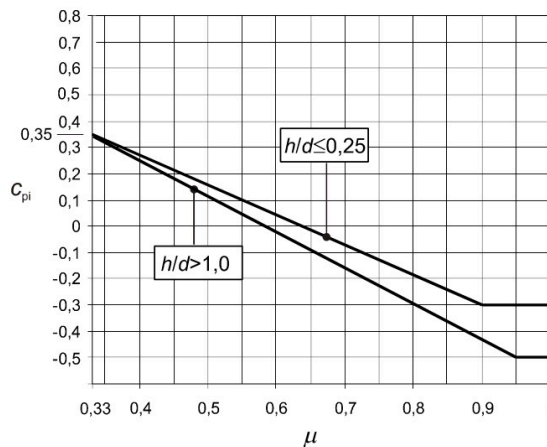


Figura 4 – Coeficientes de pressão interior no caso de aberturas uniformemente distribuídas (LNEC 2010)

em que:

$$\mu = \frac{\sum \text{área das aberturas em que } c_{pe} \text{ é negativo ou } -0,0}{\sum \text{área de todas as aberturas}} \quad (13)$$

Quando não for possível calcular μ , ou tal cálculo não se justifique, o coeficiente c_{pi} deve ser considerado com o valor mais gravoso de entre +0,2 e -0,3.

De modo a ser possível calcular c_{pi} no software *XD-Wind* foi necessário traduzir o gráfico da figura 4 para equações matemáticas. Para este processo recorreu-se ao software *WebPlotDigitizer* (Figura 5). Este software é de licença gratuita e permite converter gráficos em expressões numéricas.

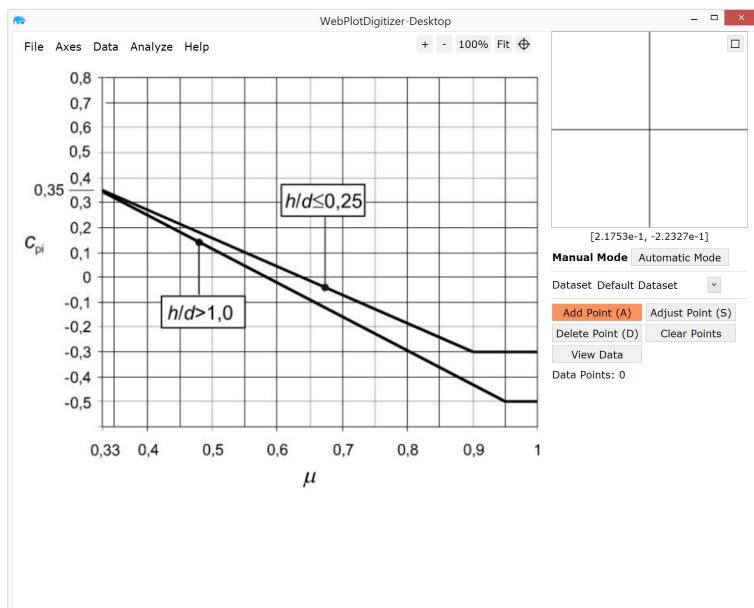


Figura 5 – Ambiente gráfico do software *WebPlotDigitizer*

Após o carregamento do gráfico é pedido que se calibrem os eixos, isto é, marcar dois pontos em cada eixo e atribuir-lhes valores (Figura 6).

X and Y Axes Calibration

Enter X-values of the two points clicked on X-axis and
Y-values of the two points clicked on Y-axes

	Point 1	Point 2	Log Scale
X-Axis:	0.33	1	<input type="checkbox"/>
Y-Axis:	-0.5	0.5	<input type="checkbox"/>

*For dates, use yyyy/mm/dd format (e.g. 2013/10/23 or 2013/10). For exponents, enter values as 1e-3 for 10⁻³.

OK

Figura 6 – Menu de calibração dos eixos do software *WebPlotDigitizer*

Posteriormente marcam-se pontos na reta de maneira a fazer um levantamento de pontos (Figura 7).

Acquired Data

Dataset: Default Dataset

Variables: X, Y

```
0.33, 0.34905660377359494
0.9020397111913356, -0.2955974842767295
```

Select All Download .CSV Graph in Plotly* Close

*Plotly is a secure data analysis and graphing site with data sharing and access controls. Visit <http://plot.ly> for details.

Sort
Sort by: Raw
Order: Ascending

Format
Number Formatting:
Digits: 5 Ignore
Column Separator: ,
Format

Figura 7 – Menu de calibração dos eixos do software *WebPlotDigitizer*

Com os pontos obtidos é possível fazer uma regressão linear ou definir a equação da reta:

$$y = \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) x + b \quad (14)$$

Onde:

y – Ordenada,

$\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)$ – Declive da reta,

x – Abcissa,

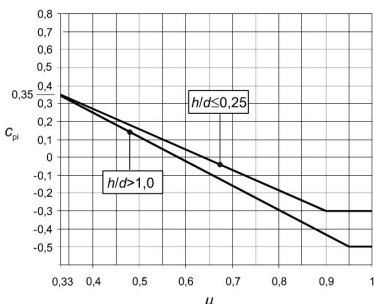
b – Ordenada na origem.

Este é um processo que pode embora possa induzir algum erro é mais preciso que a leitura dos gráficos a olho nu.

A leitura dos gráficos necessários para o software XD-Wind será feita através do supramencionado procedimento.

Após a conversão do gráfico da figura 4 os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 2 – Análise do gráfico 1

Gráfico	Equações
	Para $h/d \leq 0.25$
	Para $0.33 < \mu < 0.90$
	$c_{pi} = -0.97\mu + 0.73$
	Para $\mu > 0.90$
	$c_{pi} = -0.30$
	Para $h/d \geq 1.00$
	Para $0.33 < \mu < 0.95$
	$c_{pi} = -1.37\mu + 0.80$
	Para $\mu > 0.95$
	$c_{pi} = -0.30$

A força exercida pelo vento, F_w , pode então ser determinada pela soma vetorial das forças $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ e F_{fr} , calculadas a partir das expressões:

Sabendo os coeficientes de pressão ou de força é possível calcular a força exercida pelo vento, F_w , sobre uma construção ou um elemento através das expressões:

- Coeficientes de força:

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(z_e) \times A_{ref} \quad (15)$$

- Coeficientes de pressão:

- Forças exteriores

$$F_{w,e} = c_s c_d \times \sum_{\text{superfícies}} w_e \times A_{ref} \quad (16)$$

- Forças interiores

$$F_{w,i} = \sum_{\text{superfícies}} w_i \times A_{ref} \quad (17)$$

- Forças de atrito (paralelas à superfície)

$$F_{fr} = c_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{fr} \quad (18)$$

em que:

$c_s c_d$ – Coeficiente estrutural (para edifícios é geralmente considerado 1,0),

c_f – Coeficiente de força,

q_p – Pressão de pico,

z_e – Altura de referência,

w_e – Pressão exercida sobre superfícies exteriores,

w_i – Pressão exercida sobre superfícies interiores,

A_{ref} – Área de referência da superfície individual,

c_{fr} – Coeficiente de atrito,

A_{fr} – Área de superfície exterior paralela ao vento.

Tabela 3 – Coeficientes de atrito c_{fr} para paredes platibandas e coberturas (LNEC 2010)

Superfície	Coeficiente de atrito c_{fr}
Lisa (ex: aço, betão liso)	0,01
Rugosa (ex: betão rugoso, placas betumadas)	0,02
Muito rugosa (ex: superfícies com ondulações, nervuras, dobras)	0,04

2.1.3. Coeficientes de pressão ou de força

2.1.3.1. Edifícios

Paredes verticais de edifícios (Figura 8)

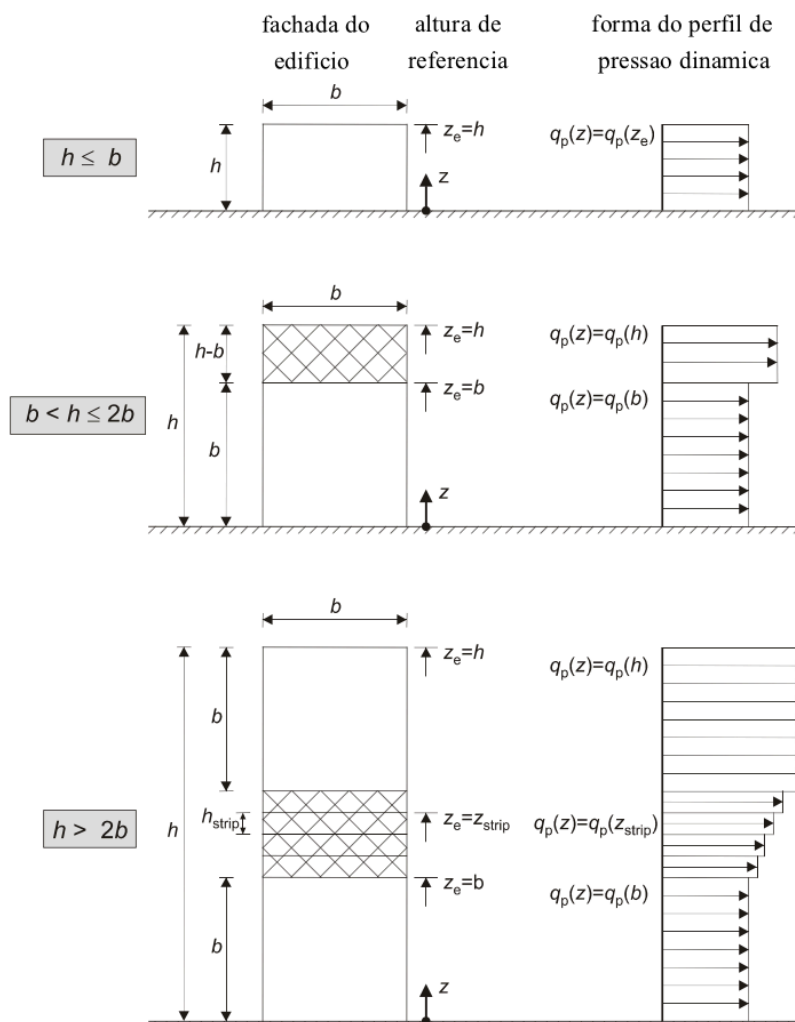


Figura 8 – Altura de referência z_e em função de h e b , e correspondente perfil de pressão dinâmica (LNEC 2010)

Esta divisão das paredes verticais de acordo com a altura deve fazer-se apenas para a face a barlavento (zona D).

Os coeficientes de pressão exteriores e as algumas das zonas (Figura 9). encontram-se na seguinte tabela.

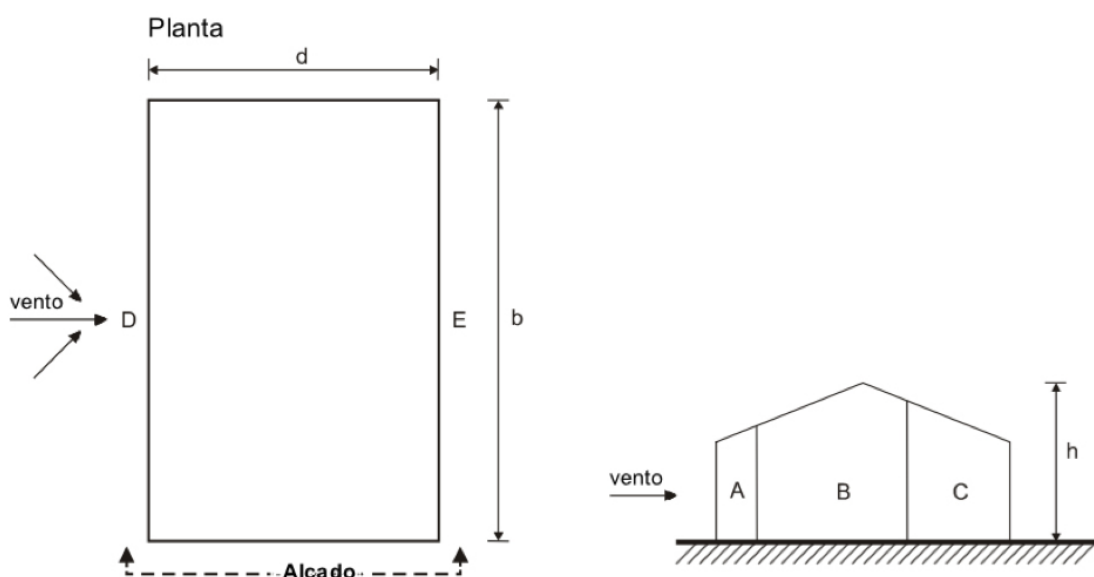


Figura 9 – Zonas em paredes verticais (LNEC 2010)

Tabela 4 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta retangular (LNEC 2010)

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Coberturas em terraço

São consideradas coberturas em terraço coberturas cuja inclinação seja menor de que 5° (Figura 10).

A altura de referência (z_e) é considerada o ponto mais alto da cobertura, por exemplo, no caso de uma cobertura com platibandas esta altura é medida até ao topo das platibandas. Os valores de c_{pe} são dados para bordos em aresta viva, amansarados, arredondados e platibandas (LNEC 2010).

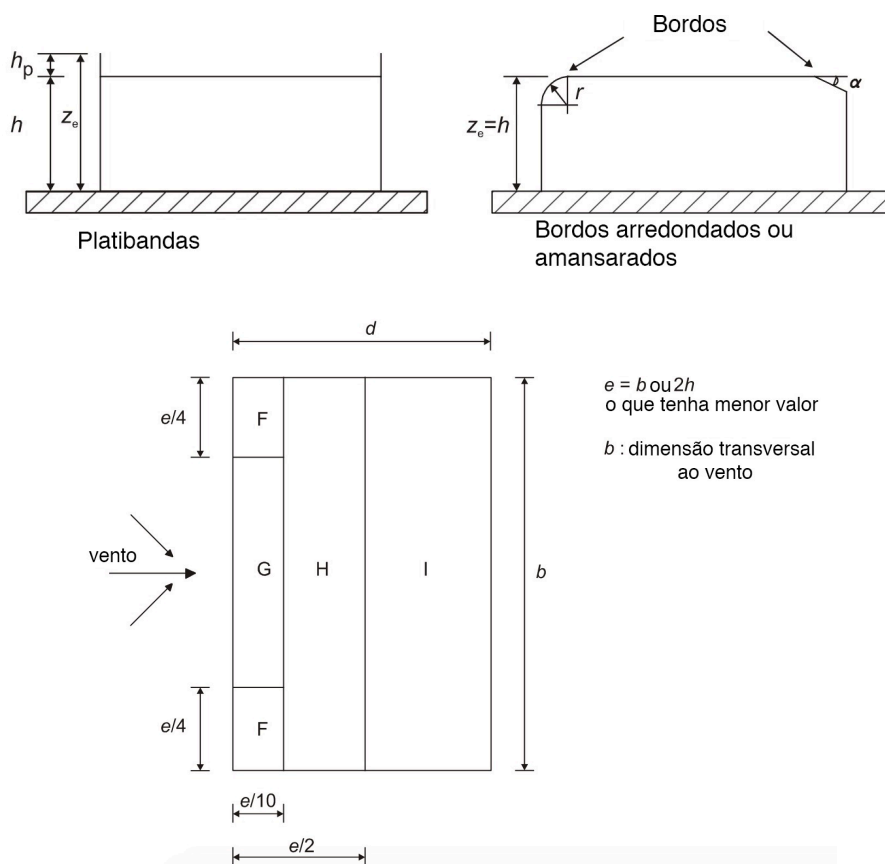


Figura 10 - Zonas em coberturas em terraço (LNEC 2010)

Tabela 5 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas em terraço(LNEC 2010)

Tipo de cobertura		Zona							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Bordos em aresta viva		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Com platibanda	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
								+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
								+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
								+0,2	-0,2

Tipo de cobertura		Zona							
		F		G		H		I	
		$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Bordos arredondados	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2	-0,2
Bordos amansardados	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		+0,2	-0,2

Coberturas de uma vertente

Coberturas com uma água cujo ângulo de inclinação se encontre entre 5° e 75° são consideradas coberturas de uma vertente. (Figura 11)

A altura de referência (z_e) é medida até ao ponto mais alto da cobertura.

Os valores de c_{pe} são dados para bordos em aresta viva (LNEC 2010).

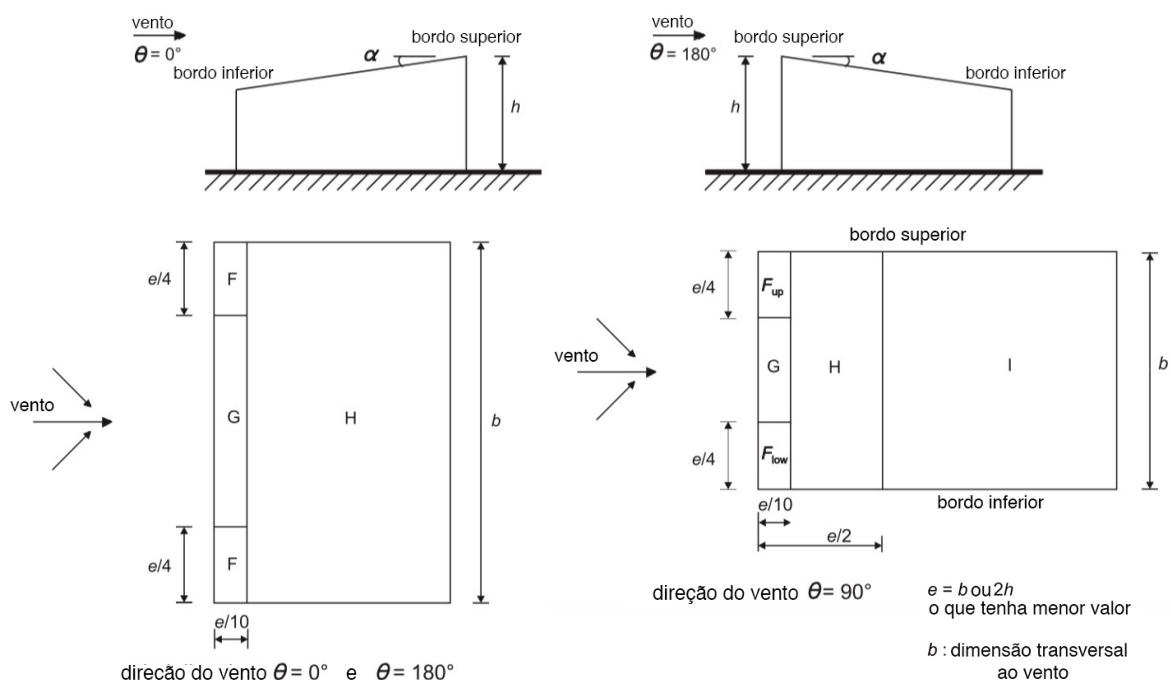


Figura 11 – Zonas em coberturas de uma vertente (LNEC 2010)

Tabela 6 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas de uma vertente para as direções do vento 0°, 90° e 180°(LNEC 2010)

Ângulo de inclinação α	Zona; Direcção do vento $\theta=0^{\circ}$						Zona; Direcção do vento $\theta=180^{\circ}$					
	F		G		H		F		G		H	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2
	+0,0		+0,0		+0,0							
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,6	-1,3	-0,5		-0,7	
	+0,7		+0,7		+0,6							
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	

Ângulo de inclinação α	Zona; Direcção do vento $\theta=90^{\circ}$									
	F_{up}		F_{low}		G		H		I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5°	-2,1	-2,6	-2,1	-2,4	-1,8	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
15°	-2,4	-2,9	-1,6	-2,4	-1,9	-2,5	-0,8	-1,2	-0,7	-1,2
30°	-2,1	-2,9	-1,3	-2,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,3	-0,8	-1,2
45°	-1,5	-2,4	-1,3	-2,0	-1,4	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
60°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,7	-1,2
75°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,5	

Coberturas de duas vertentes

Coberturas com duas águas cujo ângulo de inclinação se encontre entre -45° e -5° e 5° e 75° são consideradas coberturas de duas vertentes (Figura 12). Quando o ângulo de inclinação estiver entre -5° e 5° devem ser consideradas coberturas em terraço.

Os coeficientes são apenas válidos para vertentes com a mesma inclinação, isto é, vertentes simétricas, contudo quando a diferença não for muito grande deve usar-se o ângulo de inclinação da vertente a barlavento.

A altura de referência (z_e) é medida até ao ponto mais alto da cobertura.

Os valores de c_{pe} são dados para bordos em aresta viva (LNEC 2010).

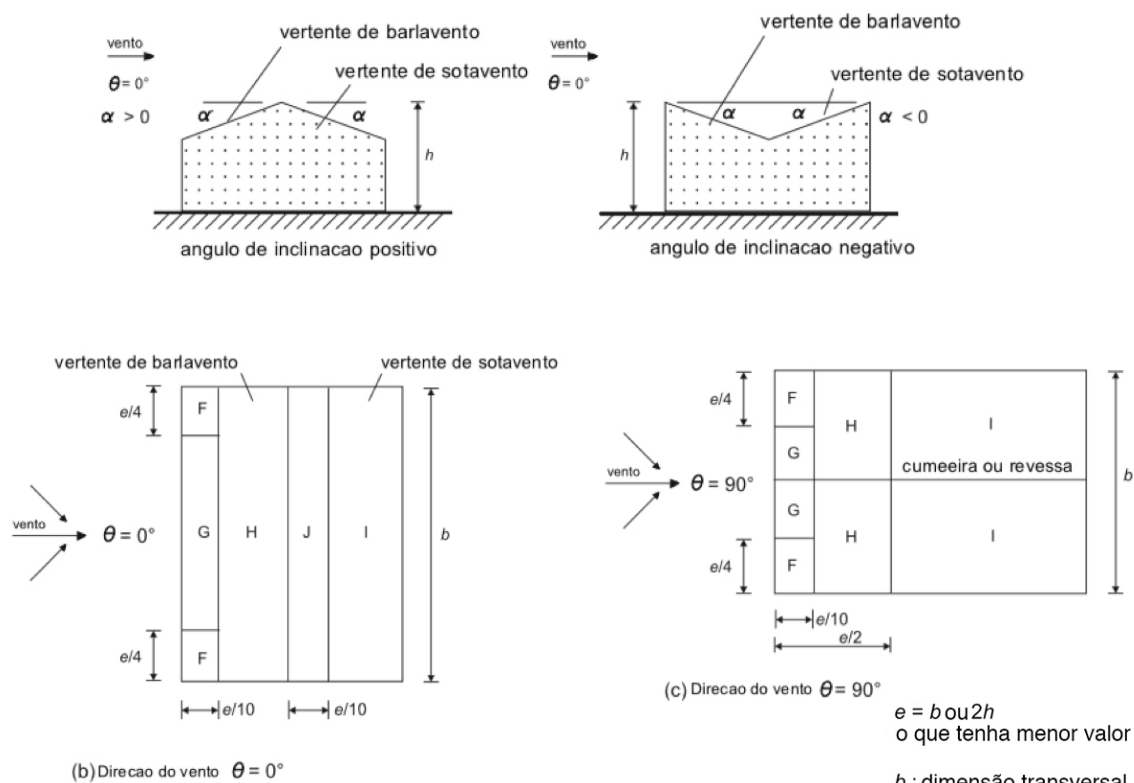


Figura 12 – Zonas em coberturas de duas vertentes (LNEC 2010)

Coberturas de quatro vertentes

Coberturas com quatro águas cujo ângulo de inclinação esteja compreendido entre 5 e 75°, mesmo que os ângulos entre as vertentes sejam diferentes (Figura 13).

O ângulo de inclinação a usar para o cálculo dos coeficientes de pressão é sempre o ângulo da vertente a barlavento.

A altura de referência (z_e) é medida até ao ponto mais alto da cobertura.

Os valores de c_{pe} são dados para bordos em aresta viva (LNEC 2010).

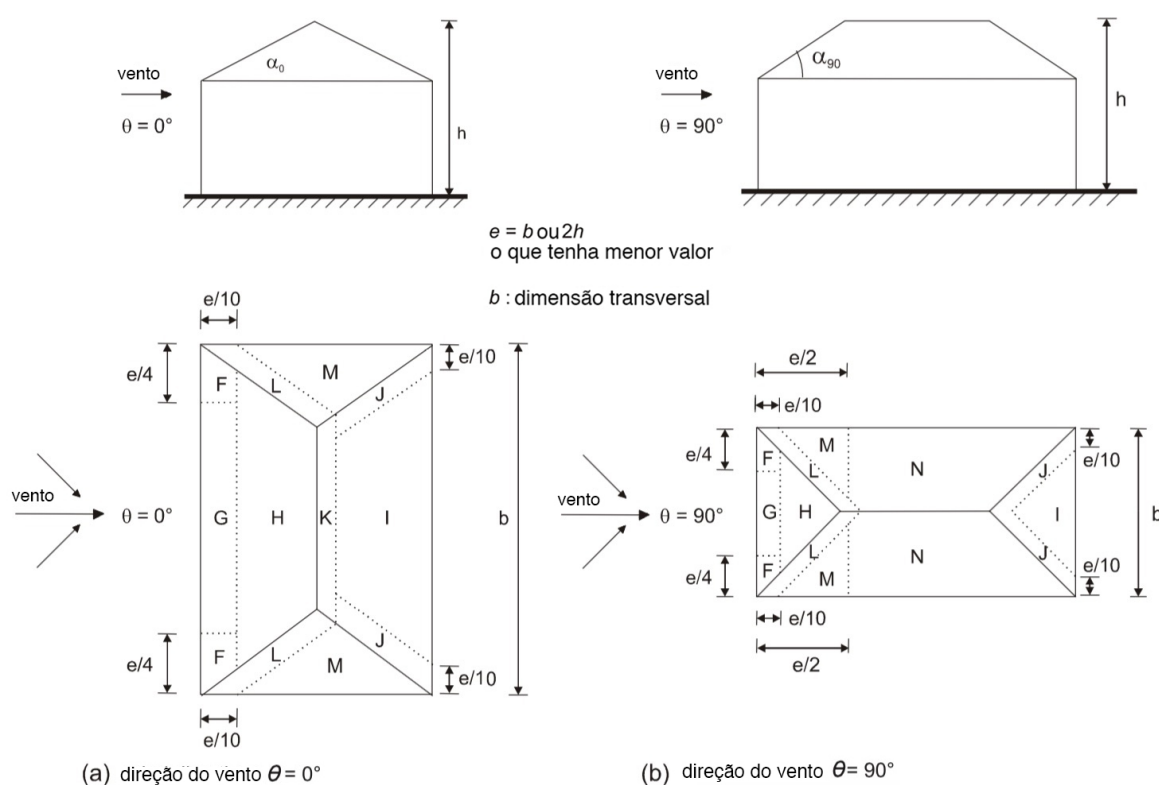


Figura 13 – Zonas em coberturas de 4 vertentes (LNEC 2010)

Tabela 7 - Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas de quatro vertentes (LNEC 2010)

Ângulo de inclinação	Zona; Direcção do vento $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$																	
	F		G		H		I		J		K		L		M		N	
α_0 para $\theta = 0^\circ$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
α_{90} para $\theta = 90^\circ$																		
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3		-0,6		-0,6		-1,2	-2,0	-0,6	-1,2		-0,4
	+0,0		+0,0		+0,0													
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,5	-1,0	-1,5	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-0,6	-1,2			-0,3
	+0,2		+0,2		+0,2													
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4	-0,7	-1,2	-0,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2				-0,2
	+0,5		+0,7		+0,4													
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,3	-0,6	-0,3	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2					-0,2
	+0,7		+0,7		+0,6													
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,3		-0,6		-0,3		-1,2		-2,0		-0,4	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,3		-0,6		-0,3		-1,2		-2,0		-0,4	

Coberturas múltiplas

Os coeficientes de pressão para coberturas múltiplas são calculados a partir dos coeficientes para coberturas de uma vertente ou duas vertentes, contudo às vertentes seguintes à vertente a barlavento é aplicado um fator de redução (Figura 14). Caso a cobertura seja de duas vertentes as vertentes dos topos devem ser calculadas como coberturas de uma vertente e as restantes como coberturas de duas vertentes com ângulo negativo (LNEC 2010).

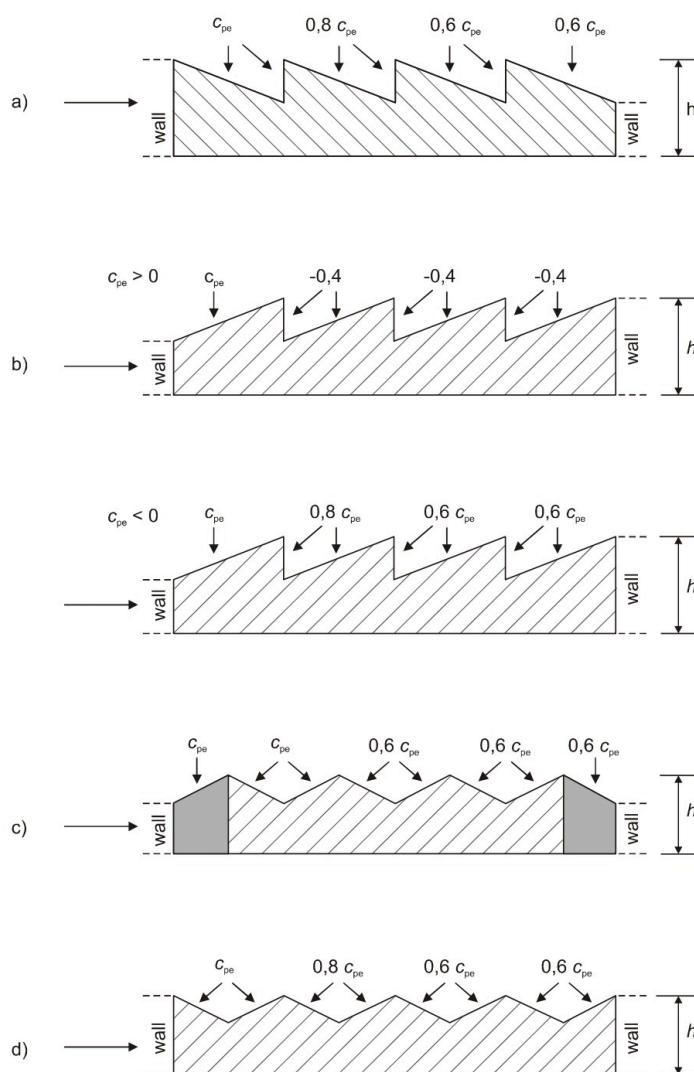


Figura 14 – Coeficientes de pressão em coberturas múltiplas (LNEC 2010)

Coberturas em abóbada e cúpulas

Segundo N. J. Cook os valores apresentados no EC1-4 parecerem ser copiados de Regulamentos Nacionais pré-existent e de resultados laboratoriais dos quais apenas resultaram valores médios (N. J. Cook 1990).

A altura de referência (z_e) é medida até ao ponto mais alto da cobertura (Figura 15).

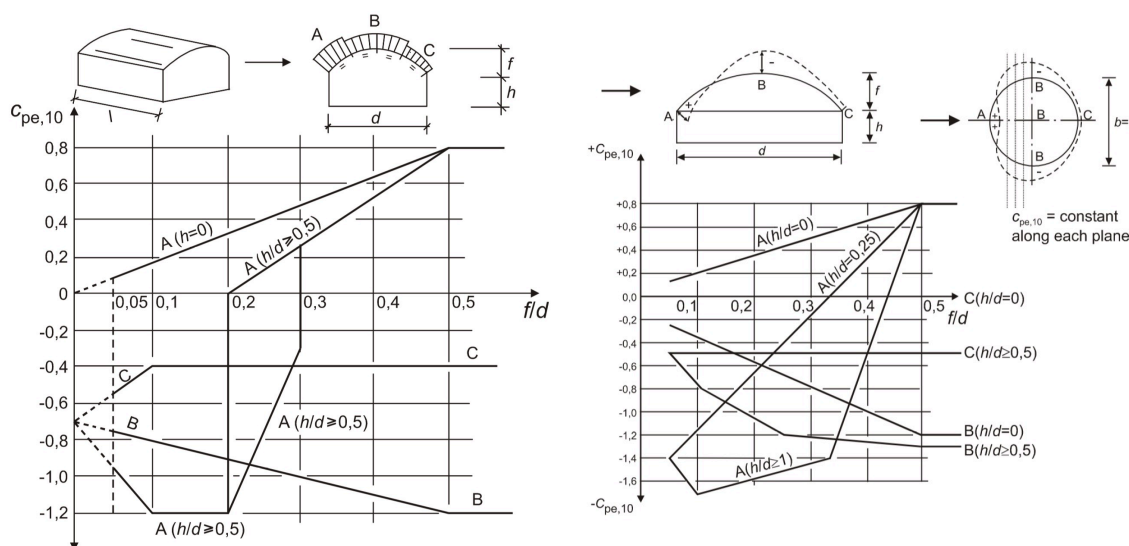


Figura 15 – Coeficientes de pressão externa para coberturas em abóbada e cúpulas (LNEC 2010)

2.1.3.2. Estruturas isoladas

Coberturas isoladas de uma e duas vertentes

São consideradas coberturas de estruturas que não têm paredes permanentes.

Estruturas normalmente abrangidas por este caso são áreas de serviço.

A pressão por baixo da cobertura depende do quão facilmente o vento flui. Surge portanto o coeficiente de obstrução, φ (Figura 16), caso exista obstrução com altura até às partes mais baixas da cobertura e se prolongue a todo o comprimento da construção, $\varphi=1$, caso não exista obstrução $\varphi=0$.

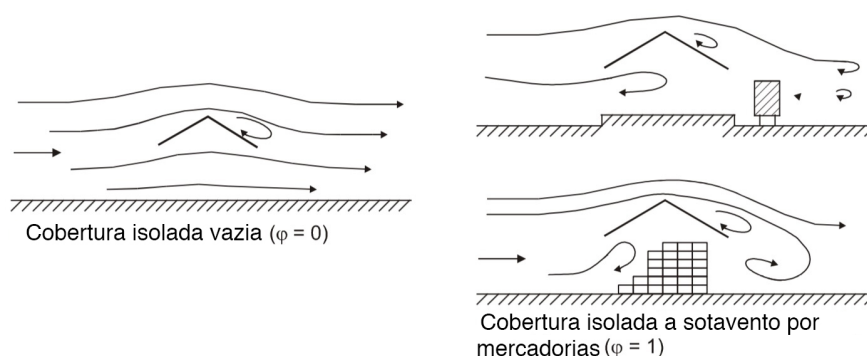


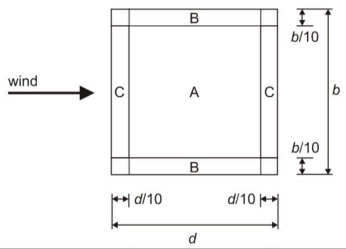
Figura 16 – Obstrução por baixo de uma cobertura de 2 vertentes (LNEC 2010)

Os coeficientes de pressão resultante, $c_{pe,net}$, representam a pressão local máxima para todas as direções do vento, estes coeficientes devem ser utilizados para o cálculo dos elementos da cobertura e ligações.

Os coeficientes de força, c_f , representam a força resultante da ação do vento.

Para coberturas de uma vertente (Figura 17) o ângulo de inclinação deverá estar compreendido entre 0° e 30° , no caso de coberturas de duas vertentes (Figura 18) o ângulo de inclinação deverá estar compreendido entre -20° e 30° .

Tabela 8 - Valores recomendados dos coeficientes de força para coberturas isolada de uma vertente (LNEC 2010)

			Coeficientes de pressão resultante $c_{p,net}$ Key plan 		
Inclinação da cobertura α	Obstrução φ	Coeficientes de força global c_f	Zona A	Zona B	Zona C
0°	Máximo, qualquer φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Máximo, qualquer φ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Máximo, qualquer φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,6	- 2,7
15°	Máximo, qualquer φ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Máximo, qualquer φ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Máximo, qualquer φ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Máximo, qualquer φ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Mínimo, $\varphi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Mínimo, $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7

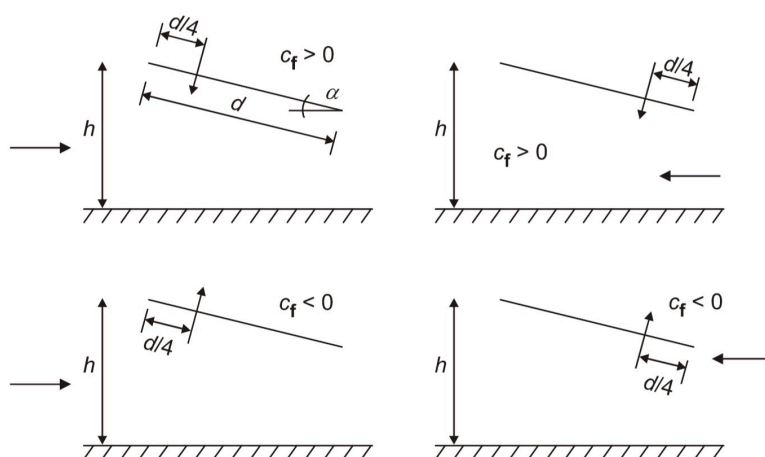
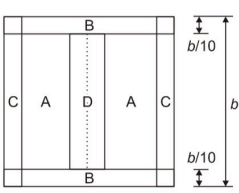
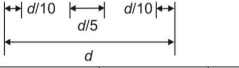


Figura 17 – Localizações possíveis para a força global sobre coberturas isoladas de uma vertente (LNEC 2010)

Tabela 9 - Valores recomendados dos coeficientes de força para coberturas isoladas de duas vertentes(LNEC 2010)

						
Inclinação da cobertura α [°]	Obstrução φ	Coeficiente de força global c_f				
			Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
- 20	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,7 - 0,7 - 1,3	+ 0,8 - 0,9 - 1,5	+ 1,6 - 1,3 - 2,4	+ 0,6 - 1,6 - 2,4	+ 1,7 - 0,6 - 0,6
- 15	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,5 - 0,6 - 1,4	+ 0,6 - 0,8 - 1,6	+ 1,5 - 1,3 - 2,7	+ 0,7 - 1,6 - 2,6	+ 1,4 - 0,6 - 0,6
- 10	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,4 - 0,6 - 1,4	+ 0,6 - 0,8 - 1,6	+ 1,4 - 1,3 - 2,7	+ 0,8 - 1,5 - 2,6	+ 1,1 - 0,6 - 0,6
- 5	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,3 - 0,5 - 1,3	+ 0,5 - 0,7 - 1,5	+ 1,5 - 1,3 - 2,4	+ 0,8 - 1,6 - 2,4	+ 0,8 - 0,6 - 0,6
+ 5	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,3 - 0,6 - 1,3	+ 0,6 - 0,6 - 1,3	+ 1,8 - 1,4 - 2,0	+ 1,3 - 1,4 - 1,8	+ 0,4 - 1,1 - 1,5
+ 10	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,4 - 0,7 - 1,3	+ 0,7 - 0,7 - 1,3	+ 1,8 - 1,5 - 2,0	+ 1,4 - 1,4 - 1,8	+ 0,4 - 1,4 - 1,8
+ 15	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,4 - 0,8 - 1,3	+ 0,9 - 0,9 - 1,3	+ 1,9 - 1,7 - 2,2	+ 1,4 - 1,4 - 1,6	+ 0,4 - 1,8 - 2,1
+ 20	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,6 - 0,9 - 1,3	+ 1,1 - 1,2 - 1,4	+ 1,9 - 1,8 - 2,2	+ 1,5 - 1,4 - 1,6	+ 0,4 - 2,0 - 2,1
+ 25	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,7 - 1,0 - 1,3	+ 1,2 - 1,4 - 1,4	+ 1,9 - 1,9 - 2,0	+ 1,6 - 1,4 - 1,5	+ 0,5 - 2,0 - 2,0
+ 30	Máximo, qualquer φ Mínimo, $\varphi = 0$ Mínimo, $\varphi = 1$	+ 0,9 - 1,0 - 1,3	+ 1,3 - 1,4 - 1,4	+ 1,9 - 1,9 - 1,8	+ 1,6 - 1,4 - 1,4	+ 0,7 - 2,0 - 2,0

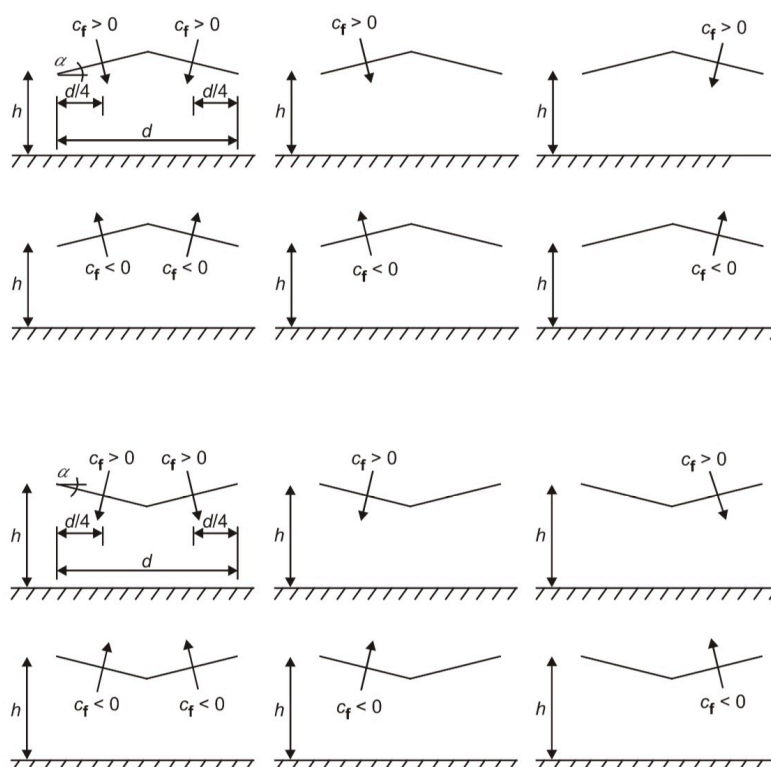


Figura 18 – Localizações possíveis para a força global sobre coberturas isoladas de duas vertentes (LNEC 2010)

Para coberturas de múltiplas vertentes (Figura 19) aplica-se o mesmo procedimento preconizado em 2.3.1.6.

Nave	Localização	Coeficientes ψ_{mc} , para qualquer valor de φ	
		sobre valores máximos (sentido descendente) dos coeficientes de força e de pressão	sobre valores mínimos (sentido ascendente) dos coeficientes de força e de pressão
1	Nave de extremidade	1,0	0,8
2	Segunda nave	0,9	0,7
3	Terceira nave e naves seguintes	0,7	0,7

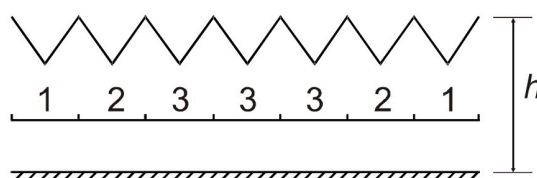


Figura 19 – Coberturas isoladas múltiplas (LNEC 2010)

Paredes isoladas, platibandas e vedações

Tal como para as coberturas isoladas, a ação do vento sobre as paredes isoladas (Figura 20), platibandas e vedações também depende da facilidade com a qual o vento flui por estas, esta propriedade é parametrizada pelo índice de cheios, φ .

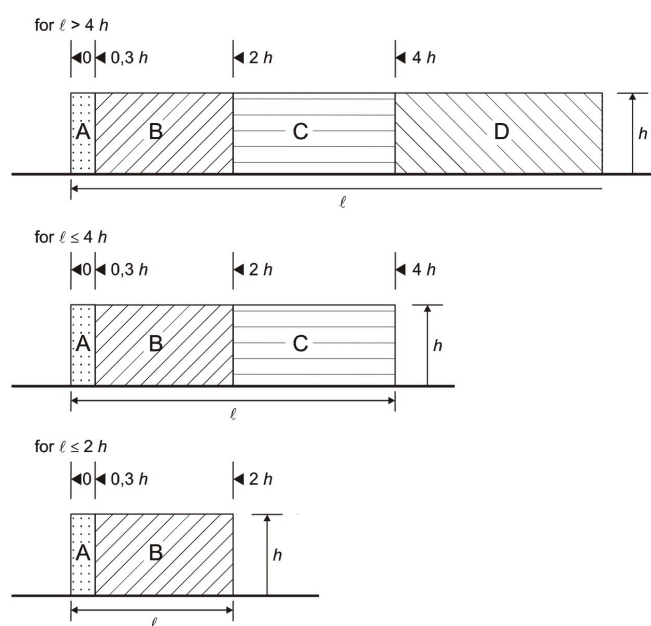


Figura 20 – Zonas em paredes verticais (LNEC 2010)

Uma vedação com $\varphi=0.9$ é uma vedação em que 90% da sua área é sólida e 10% é aberturas. Estas aberturas devem estar distribuídas uniformemente e caso não estejam deve dividir-se a área total em áreas uniformes.

Quando φ for menor que 0.8 a estrutura deve considerar-se como uma treliça plana.

 Tabela 10 – Coeficientes de força c_{f0} para paredes isoladas, platibandas, e vedações (LNEC 2010)

Índice de cheios	Zona		A	B	C	D
$\varphi = 1$	Sem panos de esquina	$\ell h \leq 3$	2,3	1,4	1,2	1,2
		$\ell h = 5$	2,9	1,8	1,4	1,2
		$\ell h \geq 10$	3,4	2,1	1,7	1,2
	Com panos de esquina de comprimento $\geq h^a$		2,1	1,8	1,4	1,2
$\varphi = 0,8$			1,2	1,2	1,2	1,2

A ação do vento é mais gravosa quando o vento atua num ângulo de 45° sobre um dos bordos da estrutura. Caso a estrutura tenha continuidade num plano perpendicular e o comprimento da estrutura perpendicular for superior à altura da estrutura o valor coeficiente de força desce.

A principal diferença entre paredes isoladas, vedações e platibandas é que para as platibandas a altura de referência (z_e) inclui a altura do edifício onde se encontram.

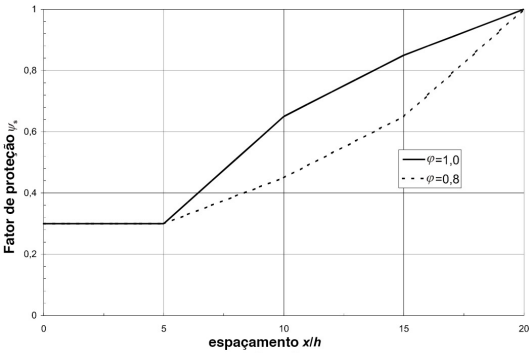
➤ Fator de proteção

O Eurocódigo1-4 permite que no caso de existirem paredes ou vedações com altura superior a h , a barlavento da estrutura em causa, seja aplicado um fator de redução (ψ_s).

Tal fator depende do espaçamento entre as estruturas e do índice de cheios da parede ou vedação a barlavento. Para índices de cheios menores que 0.8 considera-se que a parede não protege suficientemente, de modo que não se pode aplicar o fator de proteção.

O valor de ψ_s pode ser calculado ou obtido através da Tabela 11.

Tabela 11 – Representação analítica do gráfico para factor de proteção (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	Para $x/h \leq 5.00$
	Para $0.80 < \varphi < 1.00$
	$\psi_s = 0.30$
	Para $5.00 \leq x/h \leq 10.0$
	Para $\varphi = 0.80$
	$\psi_s = 0.035(x/h) + 0.127$
	Para $\varphi = 1.00$
	$\psi_s = 0.069(x/h) - 0.045$
	Para $10.0 \leq x/h \leq 15.0$
	Para $\varphi = 0.80$
	$\psi_s = 0.035(x/h) + 0.127$
	Para $\varphi = 1.00$
	$\psi_s = 0.040(x/h) + 0.247$
	Para $15.0 \leq x/h \leq 20.0$
	Para $\varphi = 0.80$
	$\psi_s = 0.035(x/h) + 0.127$
	Para $\varphi = 1.00$
	$\psi_s = 0.030(x/h) + 0.400$

Assim que obtido o fator de proteção o coeficiente de pressão a usar na parede será:

$$c_{p,net,s} = \psi_s \cdot c_{p,net} \quad (19)$$

Este fator não deve aplicar-se numa distância igual a h para ambos os bordos livres. O projetista deve ponderar a utilização deste coeficiente pois a estrutura a barlavento que esteja a servir de proteção poderá ser demolida, ou ruir, deixando a estrutura em causa desprotegida.

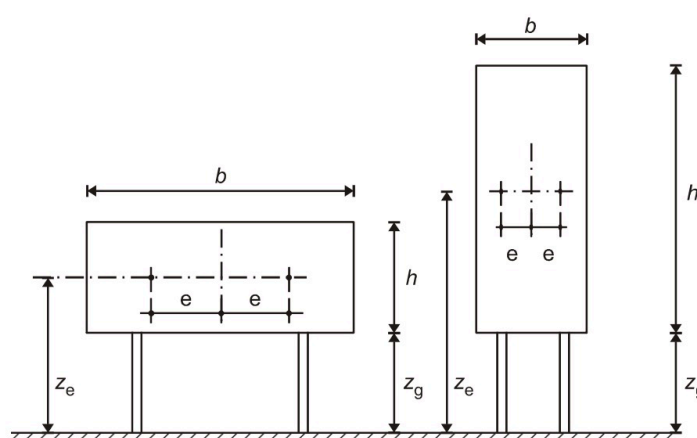
Painéis de sinalização

Consideram-se painéis de sinalização abrangidos por esta cláusula aqueles painéis em que a altura acima do solo z_g é superior a $h/4$, ou z_g é inferior a $h/4$ mas b/h é igual ou inferior a 1 (Figura 21).

O coeficiente de força para estes casos é:

$$c_f = 1.80 \quad (20)$$

A força deve ser representada a meio da altura do painel e com uma excentricidade horizontal igual a:



$$e = \pm 0.25b \quad (21)$$

Figura 21 – Painéis de sinalização (LNEC 2010)

Quando as dimensões não verificarem as condições acima o painel deve ser tratado como uma parede isolada.

2.1.3.3. Elementos estruturais

Elementos estruturais de secção retangular

O coeficiente de força para elementos estruturais de secção retangular com o vento a incidir perpendicularmente a uma face é calculado através da expressão:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda \quad (22)$$

Em que:

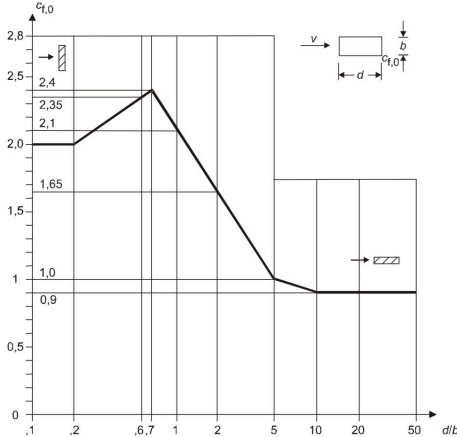
$c_{f,0}$ – Coeficiente de força para elementos de secção retangular com e sem escoamento livre,

ψ_r – Coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados, este valor depende do número de Reynolds (29)

ψ_λ – Coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento, conforme é definido em 2.4.

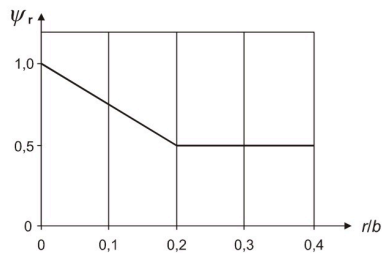
O coeficiente de força, $c_{f,0}$, pode ser obtido pela tabela 12.

Tabela 12 – Representação analítica do gráfico para coeficiente de força para seções retangulares (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	Para $0.10 < d/b \leq 0.20$
	$c_{f,0} = 2.00$
	Para $0.20 < d/b \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 0.88(d/b) + 1.83$
	Para $0.60 < d/b \leq 0.70$
	$c_{f,0} = 0.50(d/b) + 2.05$
	Para $0.70 < d/b \leq 1.00$
	$c_{f,0} = -(d/b) + 3.10$
	Para $1.00 < d/b \leq 2.00$
	$c_{f,0} = -0.45(d/b) + 2.55$
	Para $2.00 < d/b \leq 5.00$
	$c_{f,0} = -0.22(d/b) + 2.08$
	Para $5.00 < d/b \leq 10.0$
	$c_{f,0} = -0.02(d/b) + 1.10$
	Para $10.0 < d/b \leq 50.0$
	$c_{f,0} = 0.90$

O coeficiente de redução, ψ_r , pode ser obtido pela tabela 13:

Tabela 13 – Representação analítica do gráfico para coeficiente de redução para cantos arredondados(LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	Para $0.00 < r/b \leq 0.20$
	$\psi_r = -2.50(r/b) + 1.00$
	Para $0.20 < r/b \leq 0.40$
	$\psi_r = 0.50$

A área de referência, A_{ref} , é calculada através da expressão:

$$A_{ref} = l \cdot b \quad (23)$$

Em que:

l – Comprimento do elemento estrutural.

Elementos estruturais de secção com arestas vivas

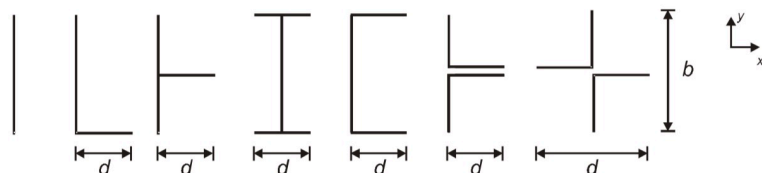


Figura 22 – Elementos estruturais de secção com arestas vivas (LNEC 2010)

Para elementos estruturais de secção com arestas vivas (Figura 22) o coeficiente de força, c_f , é calculado através da expressão:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (24)$$

Em que:

$c_{f,0}$ – Coeficiente de força para elementos de secção retangular com arestas vivas e sem escoamento livre,

ψ_λ – Coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento, conforme é definido em 2.4.

O valor de $c_{f,0}$ recomendado pelo Anexo Nacional é 2,0.

As áreas de referência devem ser calculadas através das seguintes expressões:

$$\text{Na direção x: } A_{ref,x} = l \cdot b \quad (25)$$

$$\text{Na direção y: } A_{ref,y} = l \cdot d \quad (26)$$

Elementos estruturais de secção poligonal regular

O coeficiente de força, c_f , para elementos estruturais de secção poligonal regular (Figura 23) é calculado pela expressão (24).

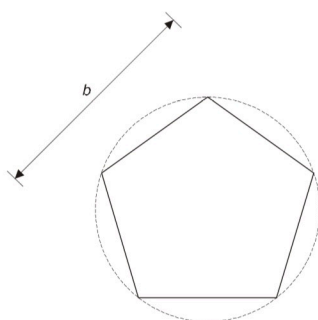


Figura 23 – Circunferência delimitadora de elementos estruturais de secção poligonal regular (LNEC 2010)

Os coeficientes de força, $c_{f,0}$, podem ser obtidos através da tabela 14:

Tabela 14 – Coeficientes de força para elementos de seção poligonal regular (LNEC 2010)

Número de lados	Secções	Condições da superfície e dos cantos	Número de Reynolds Re^a	$c_{f,0}$
5	Pentágono	Todas	Todos	1,80
6	Hexágono	Todas	Todos	1,60
8	Octógono	Superfície lisa $r/b < 0,075^b$	$Re \leq 2,4 \cdot 10^5$	1,45
			$Re \geq 3 \cdot 10^5$	1,30
		Superfície lisa $r/b \geq 0,075^b$	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	1,30
			$Re \geq 7 \cdot 10^5$	1,10
10	Decágono	Todas	Todos	1,30
12	Dodecágono	Superfície lisa ^{c)} cantos arredondados	$2 \cdot 10^5 < Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,90
		Todas as outras condições	$Re < 4 \cdot 10^5$	1,30
			$Re > 4 \cdot 10^5$	1,10
16-18	Hexadecágono -Octodecágono	Superfície lisa ^{c)} cantos arredondados	$Re < 2 \cdot 10^5$	Considerar como um cilindro de base circular; ver (7.9)
			$2 \cdot 10^5 \leq Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,70

O coeficiente de Reynolds deve calcular-se pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} \quad (27)$$

Em que:

b – Diâmetro,

$v(z_e)$ – Velocidade de pico do vento,

v – Viscosidade cinemática do ar ($15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Para elementos estruturais de secção poligonal regular deve considerar-se $v(z_e) = v_m$

A área de referência deve calcular-se pela expressão (23).

Cilindros de base circular

Para cilindros de base circular tanto os coeficientes de pressão como os coeficientes de força dependem do número de Reynolds que se calcula pela expressão:

$$Re = \frac{b \cdot v}{v} \quad (28)$$

Com:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} \quad (29)$$

Em que:

q_p – Pressão de pico calculada através da expressão 8,

ρ – Massa volúmica do ar ($1,25 \text{ kg/m}^3$)

Os coeficientes de pressão exterior podem ser calculados por:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \quad (30)$$

Onde:

$c_{p,0}$ – Coeficiente de pressão exterior sem livre escoamento em torno das extremidades,

$\psi_{\lambda\alpha}$ – Coeficiente para efeitos de extremidade.

Tabela 15 – Parâmetros para a distribuição de pressões sobre cilindros de base circular em função do número de Reynolds (LNEC 2010)

Re	α_{\min}	$c_{p0,\min}$	α_A	$c_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
10^7	75	-1,5	105	-0,8

A distribuição das pressões de acordo com a incidência do vento pode ser vista na figura 24.

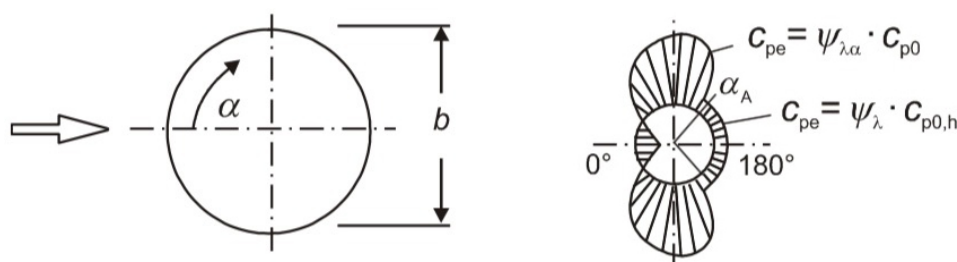


Figura 24 – Distribuição de pressões sobre cilindros de base circular (LNEC 2010)

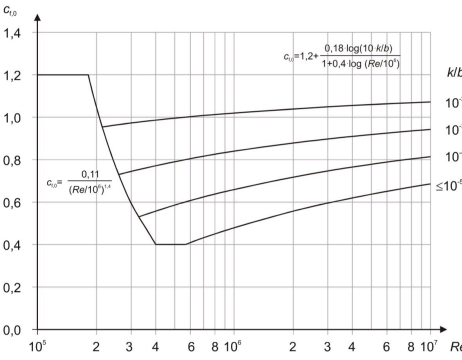
Os coeficientes de força, c_f , para cilindros de base circular podem ser calculados através da expressão (24). O coeficiente de força $c_{f,0}$ pode ser obtido pela figura 25.

A área de referência, A_{ref} , calcula-se através da expressão (23).

Tabela 16 – Rugosidade equivalente para vários tipos de materiais (LNEC 2010)

Tipo de superfície	Rugosidade equivalente k [mm]	Tipo de superfície	Rugosidade equivalente k [mm]
Vidro	0,0015	Betão liso	0,2
Metal polido	0,002	Madeira aplainada	0,5
Revestimento por pintura liso	0,006	Betão rugoso	1,0
Pintura aplicada à pistola	0,02	Madeira serrada, rugosa	2,0
Aço - superfície lisa	0,05	Superfície com ferrugem	2,0
Ferro fundido	0,2	Alvenaria de tijolo	3,0
Aço galvanizado	0,2		

Tabela 17 – Representação analítica do gráfico para coeficiente de força para seções retangulares (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	<p>Para $k/b = 10^{-2}$</p> <p>Para $10^5 \leq Re \leq 1,80 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = 1,20$ <p>Para $1,80 \times 10^5 < Re \leq 2,15 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = \frac{0,11}{(Re/10^6)^{1,4}}$ <p>Para $2,15 \times 10^5 < Re \leq 10^7$</p> $c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \cdot \log(Re/10^6)^{1,4}}$
	<p>Para $k/b = 10^{-3}$</p> <p>Para $10^5 \leq Re \leq 1,80 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = 1,20$ <p>Para $1,80 \times 10^5 < Re \leq 2,60 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = \frac{0,11}{(Re/10^6)^{1,4}}$ <p>Para $2,60 \times 10^5 < Re \leq 10^7$</p> $c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \cdot \log(Re/10^6)^{1,4}}$
	<p>Para $k/b = 10^{-4}$</p> <p>Para $10^5 \leq Re \leq 1,80 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = 1,20$ <p>Para $1,80 \times 10^5 < Re \leq 3,28 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = \frac{0,11}{(Re/10^6)^{1,4}}$ <p>Para $3,28 \times 10^5 < Re \leq 10^7$</p> $c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \cdot \log(Re/10^6)^{1,4}}$
	<p>Para $k/b \leq 10^{-5}$</p> <p>Para $10^5 \leq Re \leq 1,80 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = 1,20$ <p>Para $1,80 \times 10^5 < Re \leq 4,00 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = \frac{0,11}{(Re/10^6)^{1,4}}$ <p>Para $4,00 \times 10^5 < Re \leq 5,65 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = 0,40$ <p>Para $5,65 \times 10^5 < Re \leq 10^7$</p> $c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \cdot \log(Re/10^6)^{1,4}}$

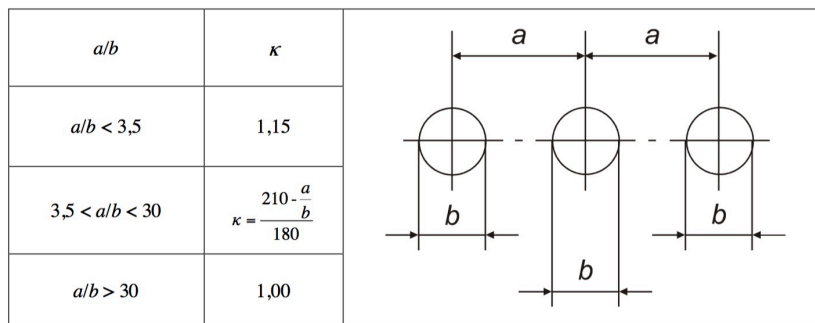
Onde k/b representa a rugosidade do material que pode ser consultada na tabela 16.

Caso exista mais que um cilindro e estejam dispostos em linha é aplicado um coeficiente, k , ao coeficiente de força, c_f , passando este a ser calculado pela expressão:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \cdot k \quad (31)$$

O coeficiente k depende da relação entre a direção do vento e o eixo de alinhamento dos cilindros, a relação entre o afastamento a e o diâmetro b , também entra em conta. Na figura 25 encontra-se o método de determinação do coeficiente k .

Figura 25 – Representação do coeficiente k (LNEC 2010)



Quando o quociente entre a distância entre um cilindro e a superfície mais próxima, z_g , e a largura do cilindro, b , for menor que 1.5 (Figura 26) será necessário um parecer especializado.

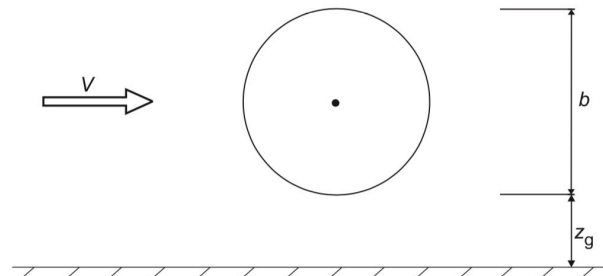


Figura 26 – Distância z_g para cilindros de base circular (LNEC 2010)

Esferas

Para esferas o coeficiente de força na direção do vento, $c_{f,x}$, depende do número de Reynolds, calculado pelas expressões (28) e (29), e da rugosidade do material (Tabela 16). Com esses dois parâmetros, $c_{f,x}$ pode ser obtido pela tabela 18.

Tabela 18 – Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para esferas (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	<p>Para $1.00 \times 10^5 < Re \leq 3.75 \times 10^6$</p> $c_{f,x} = 0.600$ <p>Para $3.75 \times 10^6 < Re \leq 5.55 \times 10^6$</p> $c_{f,x} = -8.78 \times 10^5 \cdot Re + 0.928$ <p>Para $5.55 \times 10^6 < Re \leq 6.80 \times 10^6$</p> <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-3}$</p> $c_{f,x} = 0.400$ <p>Para $k/b \neq 1.00 \times 10^{-3}$</p> $c_{f,x} = -8.78 \times 10^5 \cdot Re + 0.928$ <p>Para $6.80 \times 10^6 < Re \leq 8.29 \times 10^6$</p> <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-3}$</p> $c_{f,x} = 0.400$ <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-4}$</p> $c_{f,x} = 0.300$ <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-5}$</p> $c_{f,x} = -8.78 \times 10^5 \cdot Re + 0.928$ <p>Para $8.29 \times 10^6 < Re \leq 3.00 \times 10^8$</p> <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-3}$</p> $c_{f,x} = 0.400$ <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-4}$</p> $c_{f,x} = 0.300$ <p>Para $k/b = 1.00 \times 10^{-5}$</p> $c_{f,x} = 0.200$

Caso na vizinhança da esfera se encontre uma superfície plana e a distância entre estas for inferior a $\frac{z_g}{2}$ (Figura 27) o coeficiente de força $c_{f,x}$ deve ser multiplicado por 1.6.

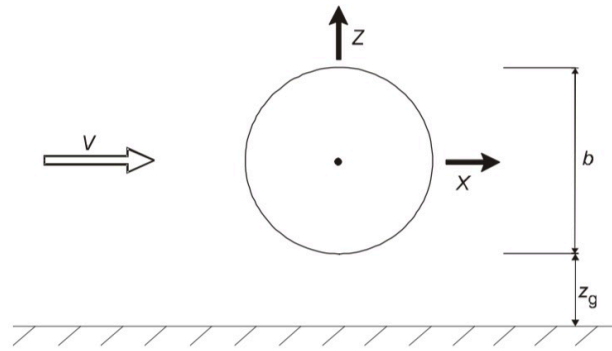


Figura 27 – Distância z_g para esferas (LNEC 2010)

A força vertical pode ser calculada através do coeficiente de força vertical $c_{f,z}$.

$$\text{Para } z_g > b/2 \quad c_{f,z} = 0 \quad (32)$$

$$\text{Para } z_g < b/2 \quad c_{f,z} = 0.60 \quad (33)$$

A área de referência, A_{ref} , é calculada por:

$$A_{ref} = \pi \cdot \frac{b^2}{4} \quad (34)$$

A altura de referência, z_e , é calculada por:

$$z_e = z_g \cdot \frac{b}{2} \quad (35)$$

2.1.3.4. Estruturas treliçadas

As estruturas treliçadas podem ser divididas pela geometria dos elementos que as constituem e o coeficiente de força para ambos os tipos depende do índice de cheios.

Para ambas o coeficiente de força, c_f , é calculado pela expressão:

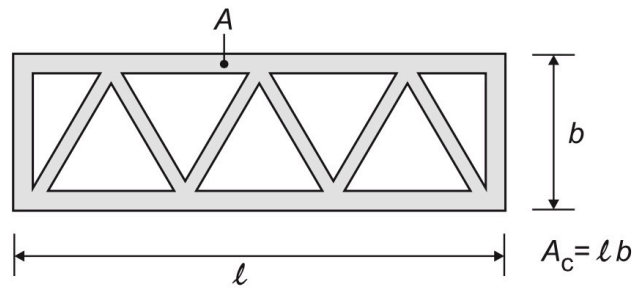
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (36)$$

Em que:

$c_{f,0}$ – Coeficiente de força para estruturas treliçadas sem efeitos de extremidade, em função do índice de cheios φ e do número de Reynolds calculado por (28) e (29)

ψ_λ – Coeficiente de efeitos de extremidade.

O índice de cheios (Figura 28) é a relação entre a área de cheios e a área total de uma estrutura plana ou no caso de uma estrutura espacial essas áreas são relativas ao plano perpendicular à direção do vento. A expressão (37) permite o cálculo do índice de cheios.


 Figura 28 – Áreas A e A_c para estruturas treliçadas (LNEC 2010)

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (37)$$

Em que:

A – Soma das áreas das projeções no plano perpendicular ao vento de todos os elementos e chapas de *gousset* da face: $A = \sum_i b_i \cdot l_i + \sum_k A_{gk}$,

A_c – Área limitada pelo contorno da face em projeção normal à mesma com $b = d$ ($A_c = d \cdot l$),

l – Comprimento da treliça,

d – Largura da treliça,

b_i, l_i – Largura/comprimento, respetivamente, do elemento *i* projetado perpendicularmente à face

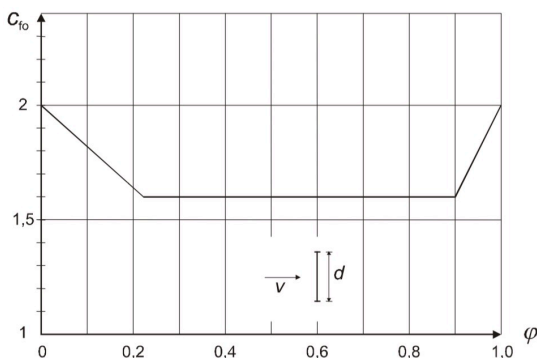
A_{gk} – Área da chapa de *gousset* *k*

Estruturas treliçadas constituídas por perfis angulosos

Para treliças planas o coeficiente de força, $c_{f,0}$, pode obter-se através da tabela 19.

Tabela 19 – Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas planas constituídas de perfis angulosos (LNEC 2010)

Gráfico



Equações

Para $0.00 < \varphi \leq 0.23$

$$c_{f,0} = -2.67\varphi + 2.00$$

Para $0.23 < \varphi \leq 0.90$

$$c_{f,0} = 1.60$$

Para $0.90 < \varphi \leq 1.00$

$$c_{f,0} = 6\varphi - 4.00$$

Para treliças espaciais o coeficiente de força, $c_{f,0}$, pode obter-se através da tabela 20.

Tabela 20 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais constituídas de perfis angulosos ° (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	a) Para $0.10 < \varphi \leq 0.20$ $c_{f,0} = -4.60\varphi + 3.17$ Para $0.20 < \varphi \leq 0.50$ $c_{f,0} = -1.98\varphi + 2.66$ Para $0.50 < \varphi \leq 0.80$ $c_{f,0} = 1.67$ Para $0.80 < \varphi \leq 1.00$ $c_{f,0} = 1.38\varphi + 0.63$
	b) e c) Para $0.10 < \varphi \leq 0.20$ $c_{f,0} = -5.90\varphi + 3.59$ Para $0.20 < \varphi \leq 0.50$ $c_{f,0} = -2.50\varphi + 2.92$ Para $0.50 < \varphi \leq 0.80$ $c_{f,0} = 1.67$ Para $0.80 < \varphi \leq 1.00$ $c_{f,0} = 1.38\varphi + 0.63$
	d) Para $0.10 < \varphi \leq 0.20$ $c_{f,0} = -6.10\varphi + 4.02$ Para $0.20 < \varphi \leq 0.80$ $c_{f,0} = -1.86\varphi + 3.16$ Para $0.80 < \varphi \leq 1.00$ $c_{f,0} = 1.38\varphi + 0.63$
	e) Para $0.10 < \varphi \leq 0.20$ $c_{f,0} = -5.40\varphi + 4.23$ Para $0.20 < \varphi \leq 0.50$ $c_{f,0} = -2.27\varphi + 3.62$ Para $0.50 < \varphi \leq 0.80$ $c_{f,0} = 0.34\varphi + 2.31$ Para $0.80 < \varphi \leq 1.00$ $c_{f,0} = 2.00\varphi + 1.05$

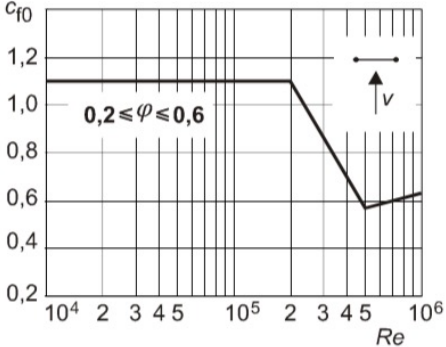
Estruturas treliçadas constituídas por perfis tubulares

Para treliças planas o coeficiente de força, $c_{f,0}$, pode obter-se através das tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas planas constituídas de perfis circulares com o vento a atuar paralelamente à estrutura ° (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	<p>Para $1.00 \times 10^4 < Re \leq 2.00 \times 10^5$</p> <p>Para $\varphi = 0.2$</p> $c_{f,0} = 0.70$ <p>Para $0.30 \leq \varphi \leq 0.40$</p> $c_{f,0} = 0.60$ <p>Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$</p> $c_{f,0} = 0.50$ <p>Para $2.00 \times 10^5 < Re \leq 2.25 \times 10^5$</p> <p>Para $\varphi = 0.2$</p> $c_{f,0} = -3.53 \times 10^{-6} \cdot Re + 1.40$ <p>Para $0.30 \leq \varphi \leq 0.40$</p> $c_{f,0} = 0.60$ <p>Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$</p> $c_{f,0} = 0.50$ <p>Para $2.25 \times 10^5 < Re \leq 2.50 \times 10^5$</p> <p>Para $\varphi = 0.2$ ou $0.30 \leq \varphi \leq 0.40$</p> $c_{f,0} = -3.53 \times 10^{-6} \cdot Re + 1.40$ <p>Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$</p> $c_{f,0} = 0.50$ <p>Para $2.50 \times 10^5 < Re \leq 2.90 \times 10^5$</p> $c_{f,0} = -3.53 \times 10^{-6} \cdot Re + 1.40$ <p>Para $2.90 \times 10^5 < Re \leq 3.15 \times 10^5$</p> <p>Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$</p> $c_{f,0} = 1.70 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.33$ <p>Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$</p> $c_{f,0} = -3.53 \times 10^{-6} \cdot Re + 1.40$ <p>Para $3.15 \times 10^5 < Re \leq 1.00 \times 10^6$</p> <p>Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$</p> $c_{f,0} = 1.70 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.33$ <p>Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$</p> $c_{f,0} = 1.50 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.26$

Tabela 22 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas planas constituídas de perfis circulares com o vento a atuar perpendicularmente à estrutura ° (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	Para $1.00 \times 10^4 < Re \leq 2.00 \times 10^5$
	$c_{f,0} = 1.10$
	Para $2.00 \times 10^5 < Re \leq 5.00 \times 10^5$
	$c_{f,0} = -1.77 \times 10^{-6} \cdot Re + 1.46$
	Para $5.00 \times 10^5 < Re \leq 1.00 \times 10^6$
	$c_{f,0} = 1.18 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.51$

Para treliças espaciais o coeficiente de força, $c_{f,0}$, pode obter-se através das tabelas 23, 24, 25 e 26.

Tabela 23 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais triangulares constituídas de perfis circulares com o vento a atuar numa aresta (LNEC 2010)

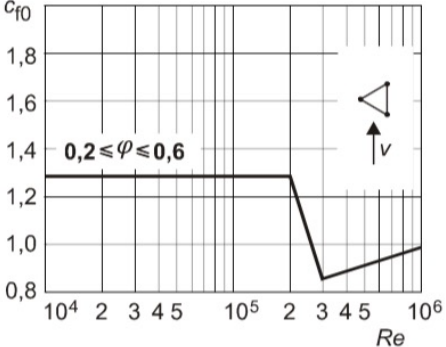
Gráfico	Equações
	Para $1.00 \times 10^4 < Re \leq 2.00 \times 10^5$
	$c_{f,0} = 1.10$
	Para $2.00 \times 10^5 < Re \leq 3.00 \times 10^5$
	$c_{f,0} = -4.33 \times 10^{-6} \cdot Re + 2.15$
	Para $3.00 \times 10^5 < Re \leq 1.00 \times 10^6$
	$c_{f,0} = 1.82 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.80$

Tabela 24 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais triangulares constituídas de perfis circulares com o vento a atuar num vértice (LNEC 2010)

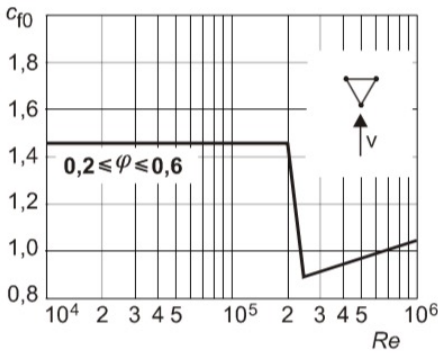
Gráfico	Equações
	Para $1.00 \times 10^4 < Re \leq 2.00 \times 10^5$
	$c_{f,0} = 1.45$
	Para $2.00 \times 10^5 < Re \leq 2.40 \times 10^5$
	$c_{f,0} = -1.23 \times 10^{-5} \cdot Re + 3.92$
	Para $2.40 \times 10^5 < Re \leq 1.00 \times 10^6$
	$c_{f,0} = 2.07 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.84$

Tabela 25 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais quadrangular constituídas de perfis circulares com o vento a atuar num vértice (LNEC 2010)

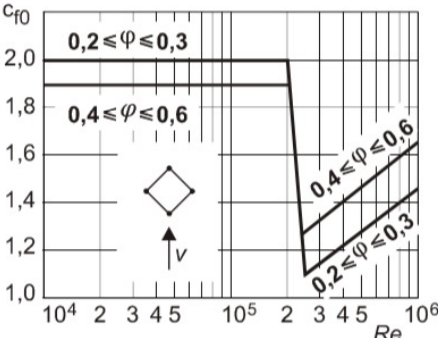
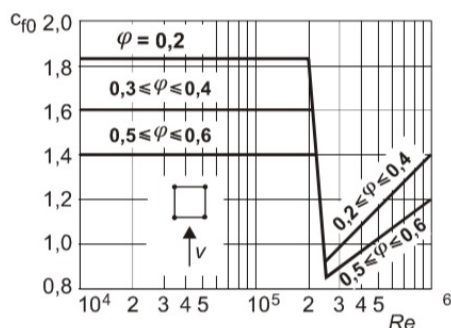
Gráfico	Equações
	Para $1.00 \times 10^4 < Re \leq 2.00 \times 10^5$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$
	$c_{f,0} = 2.00$
	Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 1.90$
	Para $2.00 \times 10^5 < Re \leq 2.10 \times 10^5$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$
	$c_{f,0} = -2.20 \times 10^{-5} \cdot Re + 6.41$
	Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 1.90$
	Para $2.10 \times 10^5 < Re \leq 2.40 \times 10^5$
	$c_{f,0} = -2.20 \times 10^{-5} \cdot Re + 6.41$
	Para $2.10 \times 10^5 < Re \leq 2.40 \times 10^5$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$
	$c_{f,0} = -2.20 \times 10^{-5} \cdot Re + 6.41$
	Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 6.33 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.93$
	Para $2.40 \times 10^5 < Re \leq 2.50 \times 10^5$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$
	$c_{f,0} = -2.20 \times 10^{-5} \cdot Re + 6.41$
	$c_{f,0} = 5.99 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.72$
	Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 6.33 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.93$

Gráfico	Equações
	Para $2.50 \times 10^5 < Re \leq 1.00 \times 10^6$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$
	$c_{f,0} = 5.99 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.72$
	Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 6.33 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.93$

Tabela 26 - Representação analítica para o gráfico, coeficientes de força para estruturas treliçadas espaciais quadrangular constituídas de perfis circulares com o vento a atuar numa aresta (LNEC 2010)

Gráfico	Equações
	Para $1.00 \times 10^4 < Re \leq 2.00 \times 10^5$
	Para $\varphi = 0.2$
	$c_{f,0} = 1.83$
	Para $0.30 \leq \varphi \leq 0.40$
	$c_{f,0} = 1.60$
	Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 1.40$
	Para $2.00 \times 10^5 < Re \leq 2.10 \times 10^5$
	Para $\varphi = 0.2$
	$c_{f,0} = -1.82 \times 10^{-5} \cdot Re + 5.47$
	Para $0.30 \leq \varphi \leq 0.40$
	$c_{f,0} = 1.60$
	Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 1.40$
	Para $2.10 \times 10^5 < Re \leq 2.20 \times 10^5$
	Para $\varphi = 0.2$ ou $0.30 \leq \varphi \leq 0.40$
	$c_{f,0} = -1.82 \times 10^{-5} \cdot Re + 5.47$
	Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 1.40$
	Para $2.20 \times 10^5 < Re \leq 2.50 \times 10^5$
	$c_{f,0} = -1.82 \times 10^{-5} \cdot Re + 5.47$
	Para $2.50 \times 10^5 < Re \leq 2.54 \times 10^5$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.40$
	$c_{f,0} = 6.30 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.77$
	Para $0.50 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = -1.82 \times 10^{-5} \cdot Re + 5.47$
	Para $2.54 \times 10^5 < Re \leq 1.00 \times 10^6$
	Para $0.20 \leq \varphi \leq 0.30$
	$c_{f,0} = 6.30 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.77$
	Para $0.40 \leq \varphi \leq 0.60$
	$c_{f,0} = 4.59 \times 10^{-7} \cdot Re + 0.74$



2.1.3.5. Esbelteza efetiva e coeficiente de efeitos de extremidade

Os coeficientes de força dados nos subcapítulos 2.3.3 e 2.3.4 referem-se a seções infinitamente compridas, afastadas do solo e sem livre escoamento em torno das extremidades. O coeficiente de efeitos de extremidade tem em conta a redução da força exercida pelo vento nas extremidades e pode ser calculado em função da esbelteza efetiva.

Tabela 27 – Possíveis casos de esbelteza efetiva (LNEC 2010)

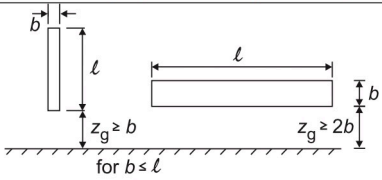
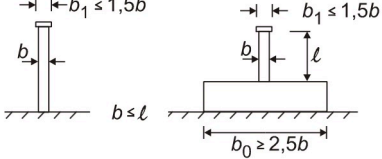
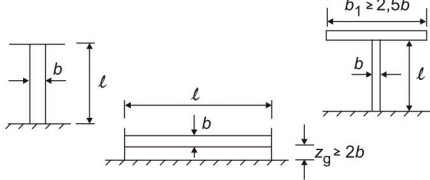
N.º	Posição da estrutura, vento perpendicular ao plano da figura	Esbelteza efectiva λ
1		$\lambda = l/b$
2		$\lambda = 2l/b$
3		$\lambda = \infty$ $(\psi_\lambda = 1)$

Tabela 28 – Representação analítica do gráfico para coeficientes de efeitos de extremidade (LNEC 2010)

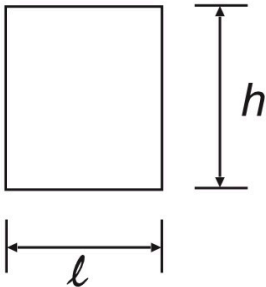
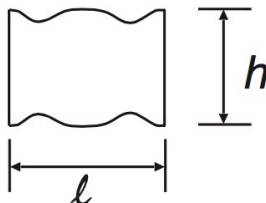
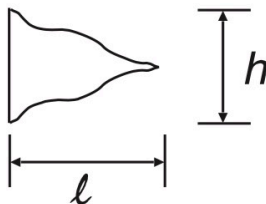
Gráfico	Equações
	Para $1.00 \leq \lambda \leq 10.0$
	Para $\varphi = 0.10$
	$\psi_{\lambda} = 2.83 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.99$
	Para $\varphi = 0.5$
	$\psi_{\lambda} = 2.83 \times 10^{-3} \cdot \lambda + 0.88$
	Para $\varphi = 0.9$
	$\psi_{\lambda} = 5.67 \times 10^{-3} \cdot \lambda + 0.82$
	Para $\varphi = 0.95$
	$\psi_{\lambda} = 8.08 \times 10^{-3} \cdot \lambda + 0.72$
	Para $\varphi = 1.0$
	$\psi_{\lambda} = 1.08 \times 10^{-2} \cdot \lambda + 0.59$
	Para $10.0 \leq \lambda \leq 100$
	Para $\varphi = 0.10$
	$\psi_{\lambda} = 1.47 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.99$
	Para $\varphi = 0.5$
	$\psi_{\lambda} = 9.69 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.90$
	Para $\varphi = 0.9$
	$\psi_{\lambda} = 1.35 \times 10^{-3} \cdot \lambda + 0.86$
	Para $\varphi = 0.95$
	$\psi_{\lambda} = 1.73 \times 10^{-3} \cdot \lambda + 0.78$
	Para $\varphi = 1.0$
	$\psi_{\lambda} = 2.76 \times 10^{-2} \cdot \lambda + 0.669$
	Para $100 \leq \lambda \leq 200$
	Para $\varphi = 0.10$
	$\psi_{\lambda} = 2.03 \times 10^{-5} \cdot \lambda + 0.99$
	Para $\varphi = 0.5$
	$\psi_{\lambda} = 2.44 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.95$
	Para $\varphi = 0.9$
	$\psi_{\lambda} = 3.37 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.93$
	Para $\varphi = 0.95$
	$\psi_{\lambda} = 4.88 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.90$
	Para $\varphi = 1.0$
	$\psi_{\lambda} = 6.91 \times 10^{-4} \cdot \lambda + 0.864$

2.1.3.6. Bandeiras

O EC1 fornece coeficientes de força para bandeiras fixas e bandeiras livres rectangulares e triangulares, ditos coeficientes podem ser vistos na tabela 28.

Um mecanismo simples que pode evitar o colapso da estrutura onde a bandeira está instalada é usar fixações plásticas que rompam ao ser atingida uma tensão que não ponha em causa a segurança de dita estrutura

Tabela 29 – Coeficientes de força para bandeiras (LNEC 2010)

Bandeiras	A_{ref}	c_f
<p>Bandeiras fixas</p>  <p>Força perpendicular ao plano</p>	$h \cdot \ell$	1,8
<p>Bandeiras livres</p> <p>a) </p> <p>b) </p> <p>Força contida no plano</p>	<p>$h \cdot \ell$</p> <p>$0,5 \cdot h \cdot \ell$</p>	$0,02 + 0,7 \cdot \frac{m_f}{\rho \cdot h} \cdot \left(\frac{A_{ref}}{h^2} \right)^{-1,25}$

2.2. Análises de ferramentas existentes

De forma a ter alguma orientação sobre o desenvolvimento do software serão neste capítulo analisadas as ferramentas que abordam a parte 4 do Eurocódigo 1.

Após pesquisa foram encontrados 6 softwares, contudo dada a falta de possibilidade de serem sujeitos a teste, foram descartados 2 (Metsec Euro 1.2, SCIA Engineer).

- **Yourspreadsheets** – Wind design spreadsheet

Licença	Paga
Plataforma	Microsoft Excel (Windows/Mac OSX)
Compatibilidade com o Anexo Nacional	Incompatível
ease of use	Boa

Descrição: Folha de cálculo baseada no Anexo Nacional do Reino Unido. Na versão de teste permite o cálculo das cargas provocadas pelo vento em paredes verticais (Figura 29).

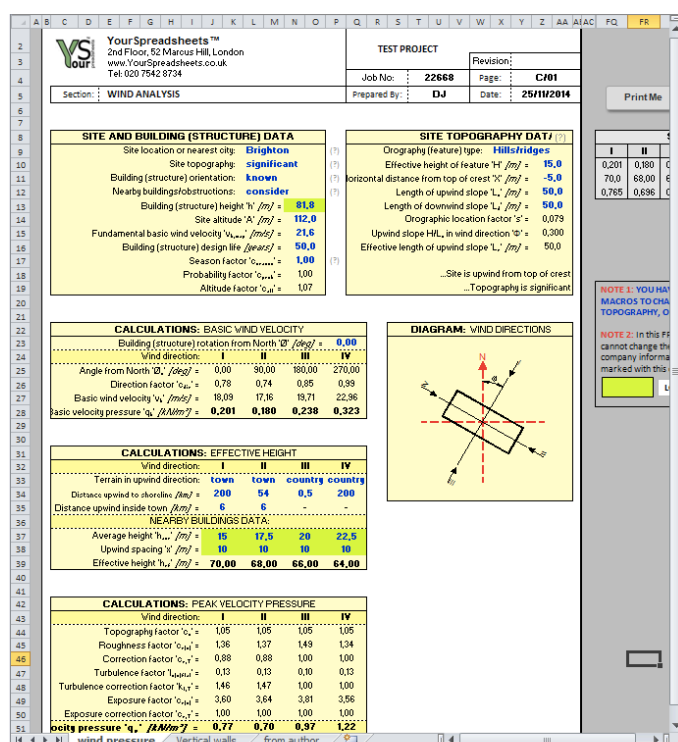


Figura 29 – Folha de cálculo da Yourspreadsheets

• **Eng. Domenico Leone – WindEC1_Rev.A (Figura 30)**

Licença	Gratuita
Plataforma	Microsoft Excel (Windows/Mac OSX)
Compatibilidade com o Anexo Nacional	Compatível
<i>ease of use</i>	Média

Descrição: folha de cálculo de distribuição gratuita que permite o cálculo da pressão dinâmica de pico dentro da Europa. A utilização é simples no entanto é uma ferramenta com poucas funcionalidades.

WIND ACTION - EN 1991-1-4 - EUROCODE 1

REFERENCE WIND

BASIC WIND VELOCITY AND VELOCITY PRESSURE

$$V_b = C_{DIR} \times C_{TEM} \times C_{ALT} \times V_{b,0} + K_s \quad \text{m/sec}$$

$V_{b,0}$ = fundamental value of the basic wind velocity defined as the characteristic 10 min mean wind velocity at 10 m above ground level of terrain of category II with an annual risk of being exceeded of 0,02 (mean return period of 50 years)

C_{DIR} = directional factor
 C_{TEM} = temporary factor (season factor: C_{temp})
 C_{ALT} ; K_s = altitude factors

$$q_b = V_b^2 \times \rho / 2 \quad \text{N/m}^2 \quad q_b = \text{basic velocity pressure}$$

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ = air density

VALUES OF WIND VELOCITY FACTORS AND BASIC VELOCITY PRESSURE FOR VARIOUS COUNTRIES

CHOOSE COUNTRY	ZONE	ALT. a.s.l.	$V_{b,0}$	$C_{DIR} \text{ max}$	$C_{TEM} \text{ max}$	C_{ALT}	K_s	V_b	q_b
	from map	m	m/sec					m/sec	N/m ²
AUSTRIA									
BELGIUM									
DENMARK									
FINLAND									
FRANCE									
GERMANY	2	100	27,6	1	1	1	0	27,6	476
GREECE									
ICELAND									
IRELAND									
ITALY	7	100	28	1	1	1	0	28,0	490
LUXEMBOURG									
NETHERLAND									
NORWAY	A		35	1	1	1	-2,50	32,5	660
PORTUGAL									
SWEDEN									
SWITZERLAND									
UK KINGDOM									

NOTES:

Figura 30 - Folha de cálculo do Eng Domenico Leone

• **Eng. Zeljko Finzgar – Opterecenja**

Licença	Gratuita
Plataforma	.NET Framework (Windows)
Compatibilidade com o Anexo Nacional	Incompatível
<i>ease of use</i>	Baixa

Descrição: Aplicação em Croata que permite o cálculo da ação do vento tanto em paredes verticais como em coberturas (Figura 32). Tem uma boa interface contudo torna-se limitada devido a barreiras linguísticas (Figura 31).

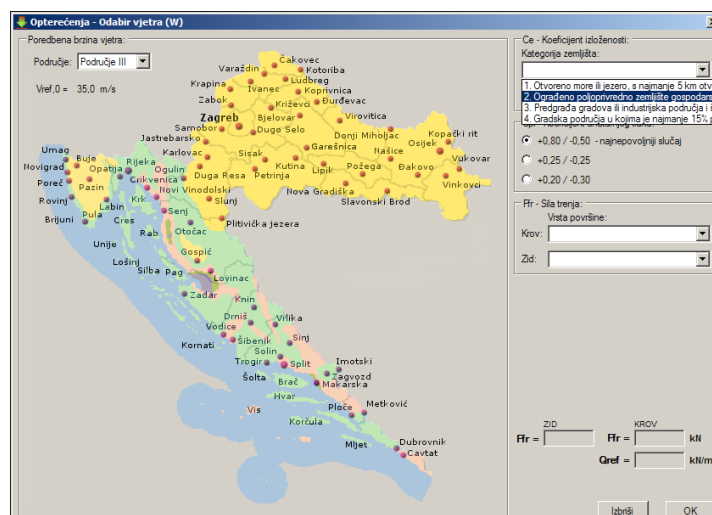


Figura 31 – Mapa de seleção de zona e tipo de rugosidade da aplicação Opterecenja

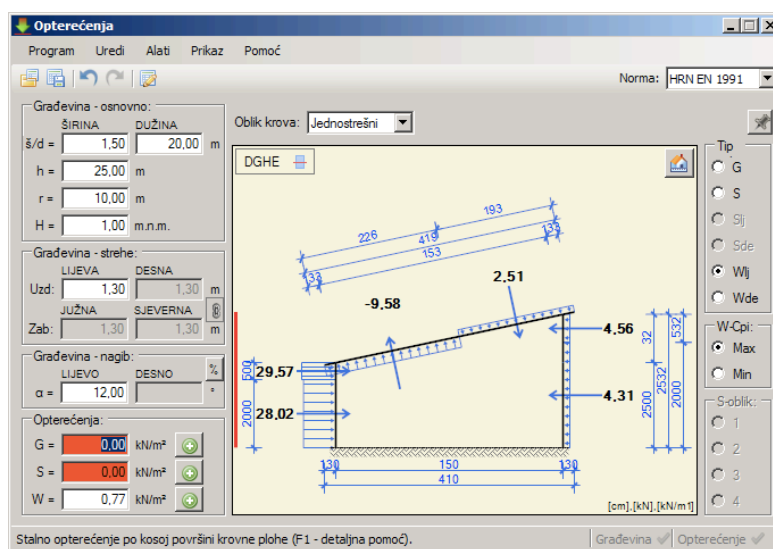


Figura 32 – Resultados obtidos através da aplicação Opterecenja

- ArcelorMittal – Portal+

Licença Gratuita

Plataforma Windows

Compatibilidade com o Anexo Nacional Compatível

ease of use Média

Descrição: Ferramenta de dimensionamento de pórticos da ArcelorMittal (Figura 33). Pode ser calculada a ação do vento, no entanto não é a principal utilidade da ferramenta o que faz com que seja muito pouco intuitiva (Figura 34).

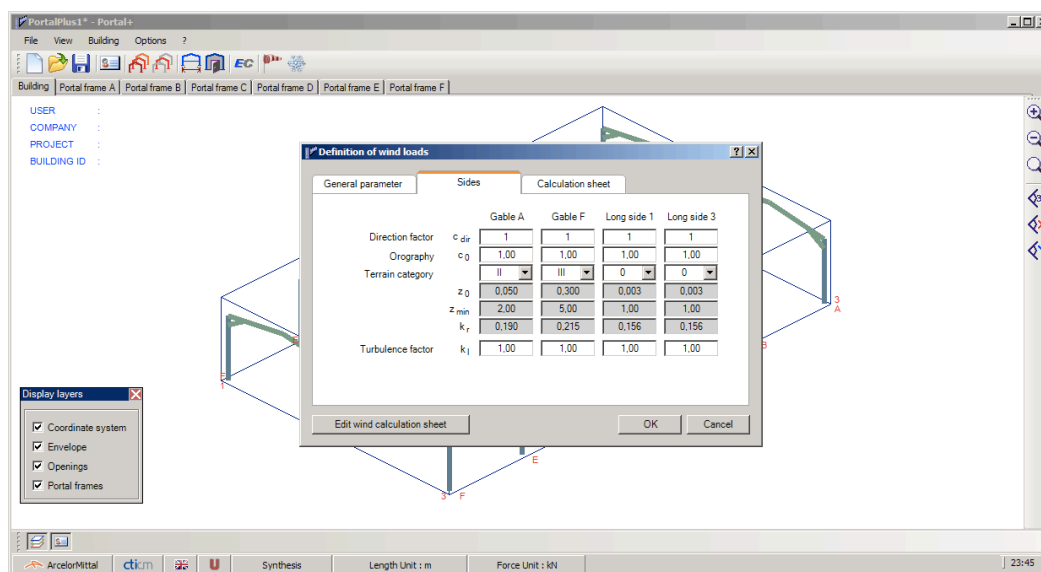


Figura 33 – Entrada de parâmetros para o cálculo da ação do vento na aplicação Portal+

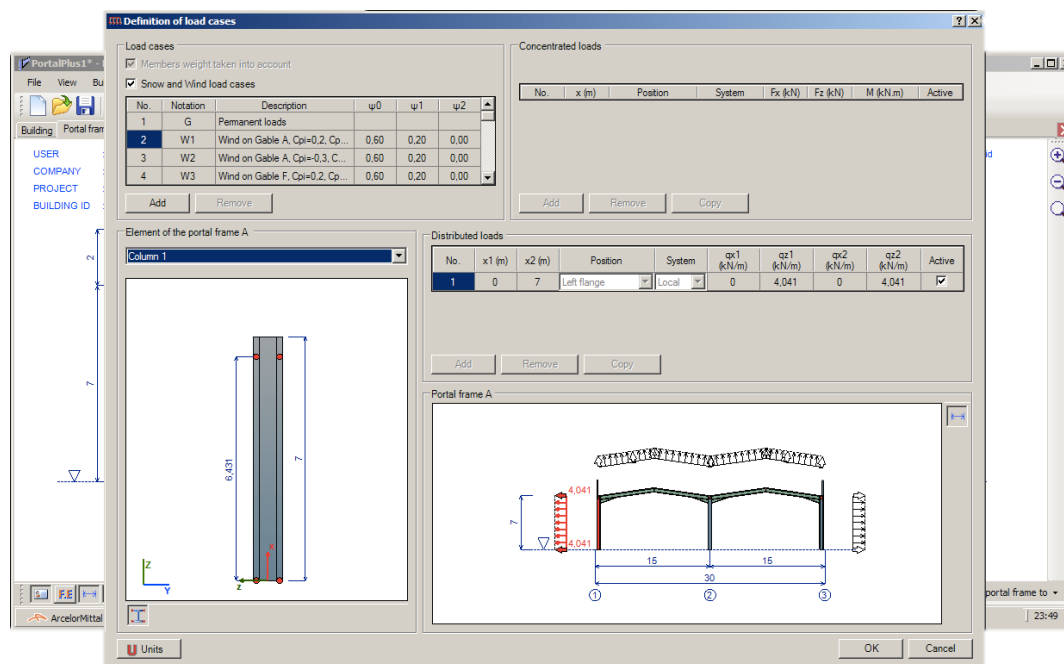


Figura 34 – Ação de sucção causada pelo vento num pilar do pórtico na aplicação Portal+

3. Programa XD-Wind

3.1. Considerações iniciais

O primeiro passo a dar na hora de iniciar o desenvolvimento de um software acaba por ser a escolha da linguagem de programação. Neste caso acabou-se por escolher Visual Basic .NET, de aqui em diante VB.NET, no entanto não foi uma escolha ao acaso.

Numa abordagem inicial as possíveis linguagens de código foram VB.NET, C# (vulgo C Sharp), e Matlab.

Matlab é uma linguagem direcionada a calculo numérico, que é a base do XD-Wind, e é leccionada na Universidade de Aveiro na unidade curricular “Aplicativos para a Ciência da Engenharia” portanto a aprendizagem não seria do zero. Contudo a Universidade de Aveiro não disponibiliza licenças com o *add on* compilador do software e esta linguagem foi portanto excluída.

Entre C# e VB.NET a escolha foi feita após alguma pesquisa. Concluiu-se que C# é uma linguagem mais eficiente e em certa medida mais “aceite” (inclusive módulos da linguagem VB.NET estão escritos em C#), no entanto escolheu-se VB.NET pela sintaxe, pelo editor com autocorreção, por não distinguir maiúsculas de minúsculas, por ser uma linguagem mais permissiva com “erros” no código e principalmente pela possibilidade do XD-Wind poder integrar um conjunto de programas já desenvolvidos pela equipa XD-Civil do departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Tabela 30 – Diferenças de operadores entre C# e VB.NET

Operação	C#	VB.NET
Esta e outra condição	&&	and
Esta ou outra condição		or
Não	!	not
Concatenar dois pedaços de texto	+	&

O desenvolvimento de um software desta complexidade requer para além de conhecimentos de programação e conhecimento sobre a norma, muito trabalho criativo para estudar qual a melhor forma de apresentar o programa ao utilizador, quais as variáveis que estão em jogo e onde apresenta-las.

3.2. Modo de utilização

A janela inicial do XD-Wind (Figura 35) dá acesso aos vários tipos de estruturas que o software abrange. A sua organização é semelhante à apresentada no capítulo 2 deste documento.

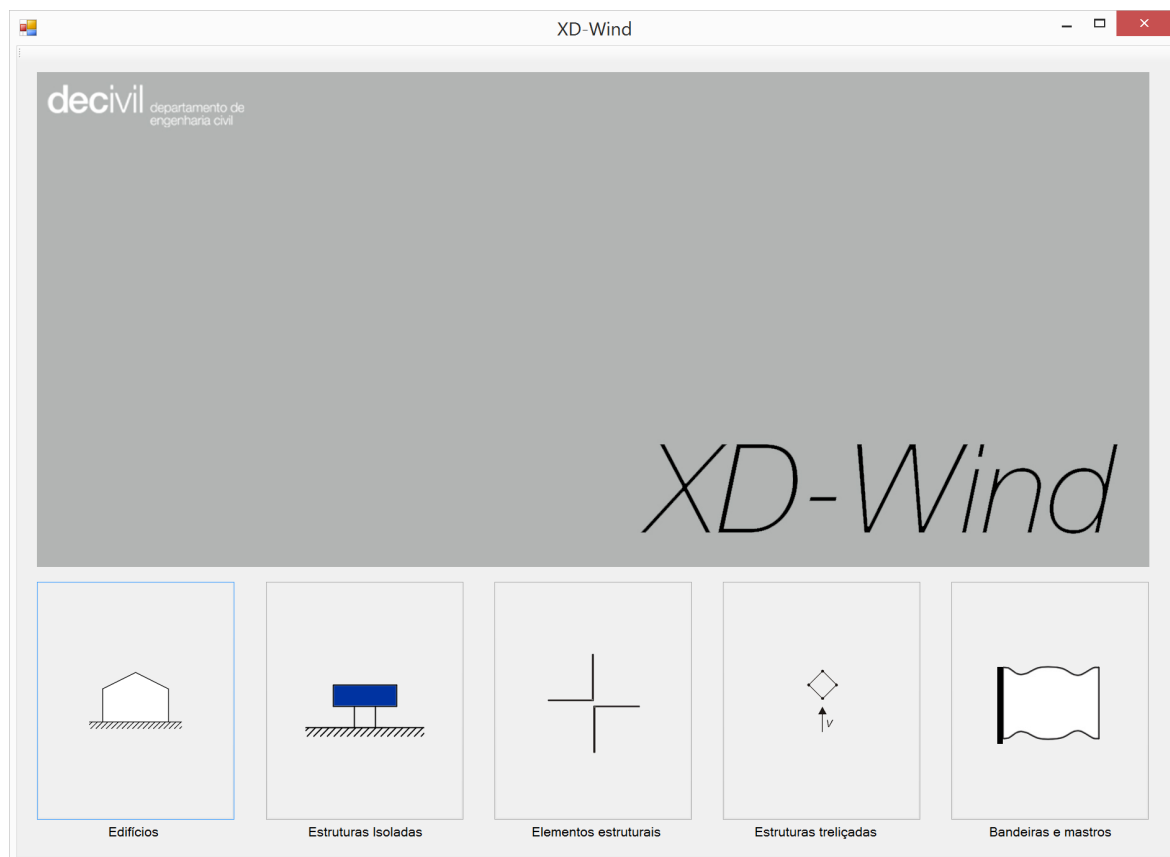


Figura 35 – Janela introdutória do XD-Wind

Após a seleção do tipo de estrutura desejada a seguinte janela define a localização e o tipo de terreno.

Nesta janela está presente um mapa que serve de ajuda à determinação entre zona A e zona B. Este mapa foi elaborado graças a um perfil geográfico de Portugal em formato digital e uma carta militar.

Com o software GlobalMapper foram delimitadas as regiões acima de 600m no perfil digital e atribuiu-se a cor vermelha, posteriormente é carregada e calibrada a carta militar no software GlobalMapper, o passo seguinte é exportar o mapa no formato e resolução desejados. Falta contudo delimitar a faixa costeira de 5km, para isso carregou-se o mapa exportado no software GIMP, foi medida em pixéis a largura de 1km na escala, criou-se uma *layer* (camada) com o contorno costeiro de Portugal e finalmente a essa *layer* foi aplicado um *stroke* na dimensão dos pixéis necessários para marcar 5km.

O resultado foi um mapa com uma resolução de 4726 por 8260 pixels, permitindo desta forma a possibilidade de fazer *zoom* com bastante detalhe (Figura 36 a) e b)).

Dadas as dimensões do mapa a navegação neste através de painéis era uma tarefa que exigia muito do processador e da memória RAM, a solução encontrada foi adotar uma livreria de domínio público chamada QueensImageControl, esta livreria torna o processo de localização no mapa perfeitamente fluído.

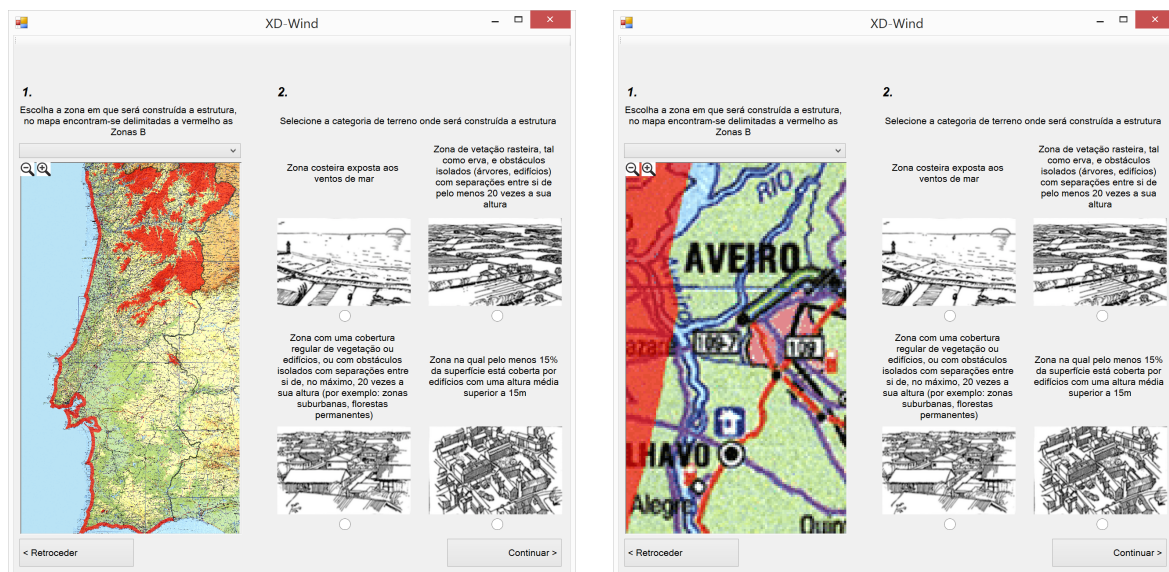


Figura 36 a) e b) – Janela de localização do XD-Wind

2.2.1. Edifícios

Selecionando o botão edifícios na janela introdutória, após selecionada a localização e a categoria de terreno a seguinte janela serve para escolher o tipo de cobertura e inserir os parâmetros geométricos do edifício (Figura 37).

Dentro deste capítulo faltam desenvolver módulos para o cálculo e representação da ação do vento sobre as paredes e sobre coberturas múltiplas.

3. Seleccione o tipo de cobertura do edifício

Selecione o tipo de cobertura do edifício

☒ Duas vertentes
 ☐ Uma vertente
 ☐ Quatro vertentes
 ☐ Platibandas
 ☐ Múltiplas vertentes

☐ Cúpula
 ☐ Bordos arredondados ou amansarados

4. Insira os dados do edifício

h: 10 m h_p : 5 m b: 10 m d: 30 m r: m z: 15 m α : 45 m

Pressão de pico (qp): 1 kPa

< Retroceder Continuar >

Figura 37 – Janela “edifícios” do XD-Wind

No painel 4 a figura central ajusta-se ao tipo de botão seleccionado no painel 3. Alguns parâmetros como, h_p , são preenchidos automaticamente.

Continuando chega-se à janela final com os resultados (Figura 38).

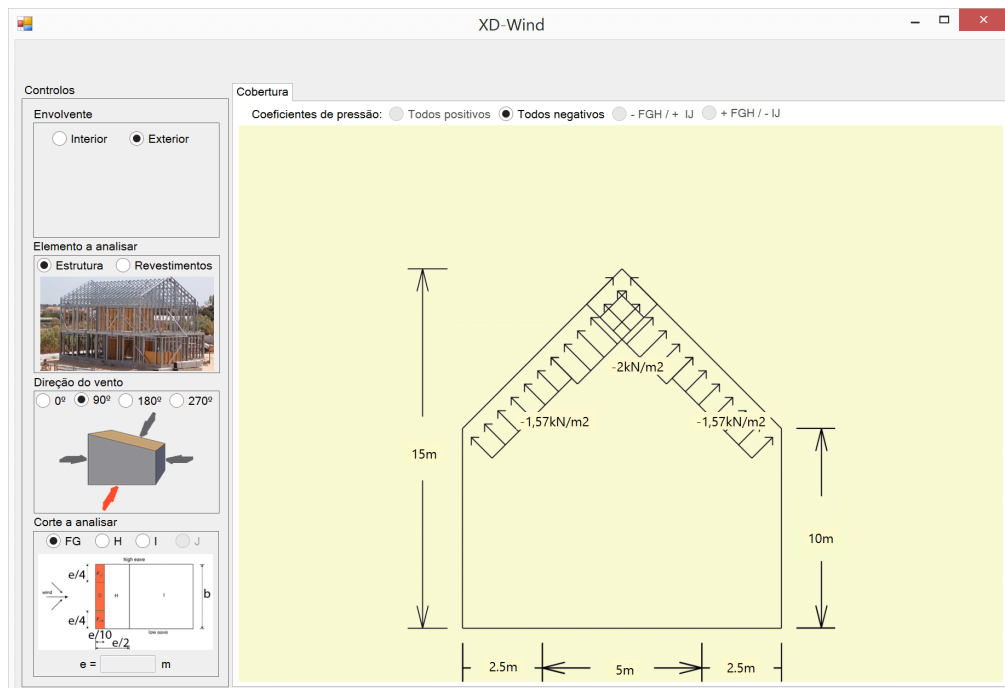


Figura 38 – Janela “edifícios duas vertentes exterior” do XD-Wind

Na figura 39 a pressão é negativa, ou seja, como o gráfico indica, a ação do vento está a fazer sucção na cobertura.

A figura é representada de acordo com o ângulo da cobertura e a representação das cargas também é de acordo ao seu valor.

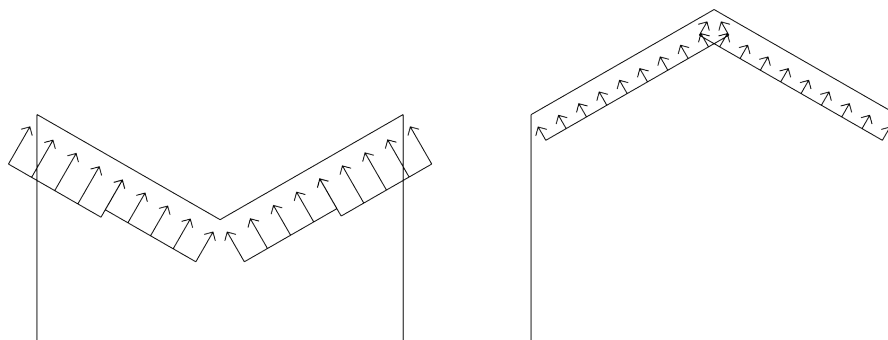


Figura 39 – Duas das possíveis representações do XD-Wind

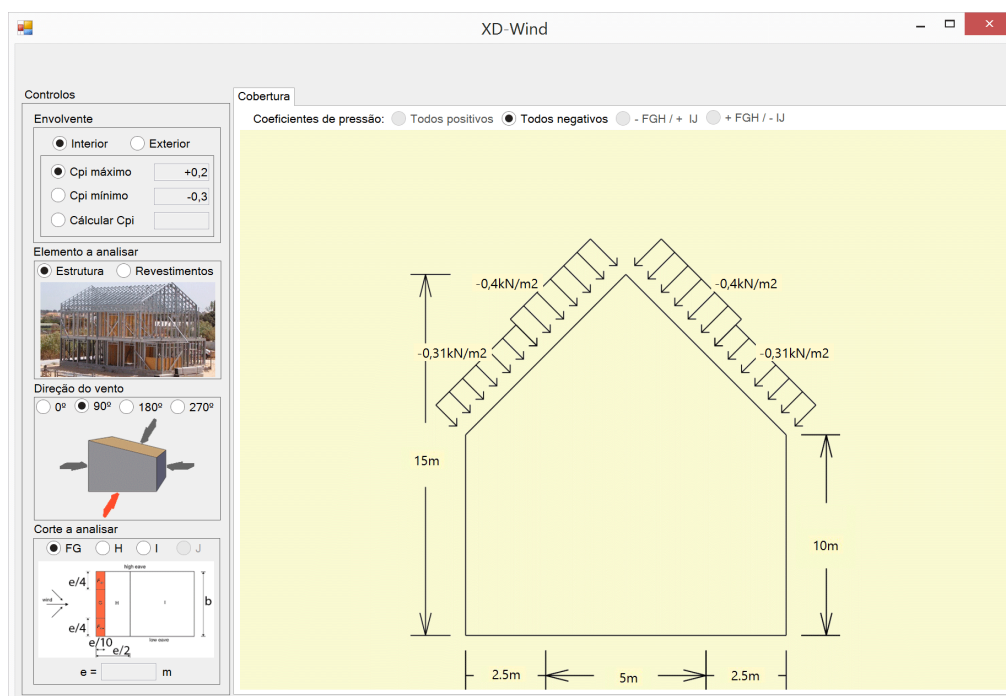


Figura 40 – Janela “edifícios duas vertentes interior” do XD-Wind

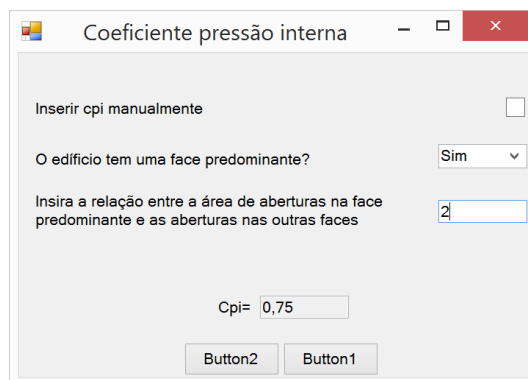


Figura 41 – Janela de cálculo avançado do coeficiente de pressão interna do XD-Wind

Ao escolher o interior são dadas opções para definir o coeficiente de pressão interior máximo e mínimo recomendados (Figura 40), ou calcula-lo através da tabela 2.

O painel “controles” gere o que é mostrado no separador à direita, qualquer botão desencadeia uma ação sobre a estrutura (Figura 42).

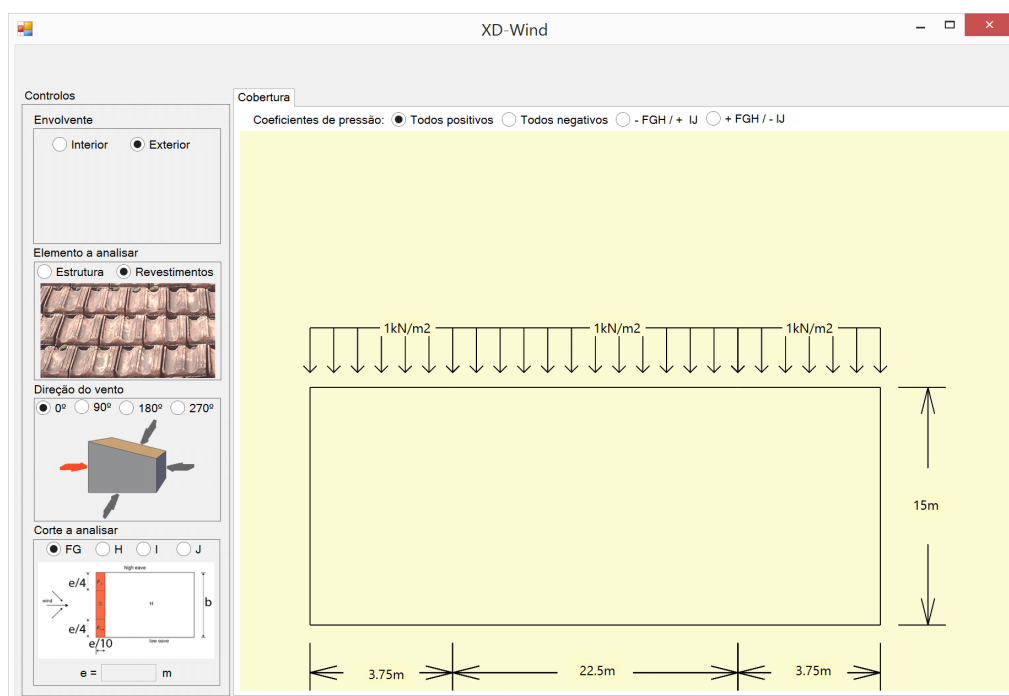


Figura 42 – Janela “edifícios duas vertentes exterior 0°” do XD-Wind

2.2.2. Estruturas isoladas

Tal como nos ponto 3.1.1. depois de selecionada a localização e a categoria de terreno o seguinte passo é parametrizar geometricamente a estrutura.

Dentro deste capítulo faltam desenvolver módulos para o cálculo e representação da ação do vento sobre coberturas múltiplas.

Cobertura isolada de duas vertentes

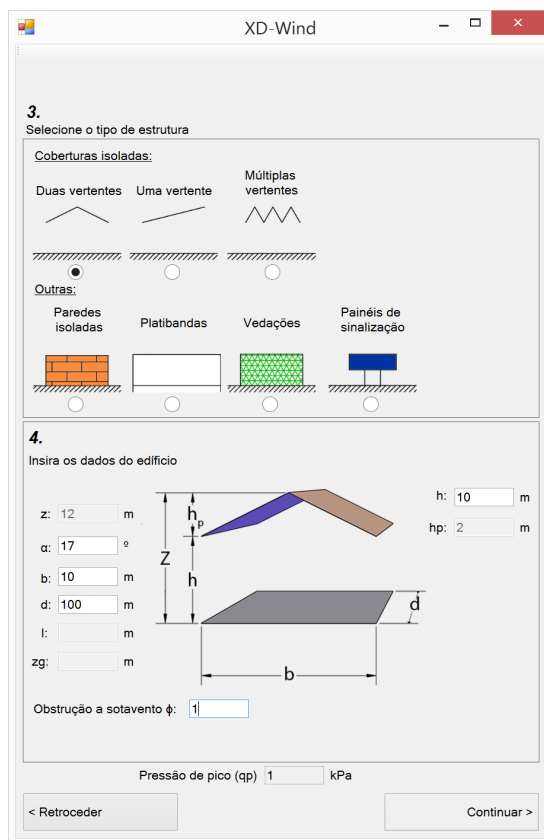


Figura 43 – Janela “Estruturas isoladas” do XD-Wind

Tal como na janela Edifícios nesta também a imagem do painel 4 se adequa ao botão selecionado no painel 3 (Figura 43).

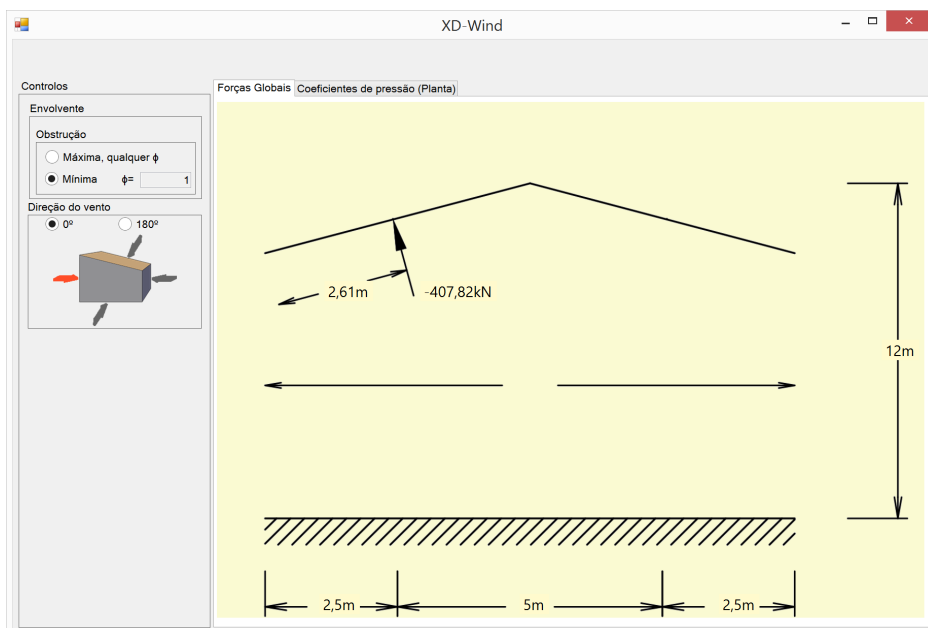


Figura 44 – Janela “Cobertura isolada com duas vertentes forças globais” do XD-Wind

No separador “Forças Globais” (Figura 44) os botões no painel “controles” alteram a situação apresentada de acordo com a Figura 18 .

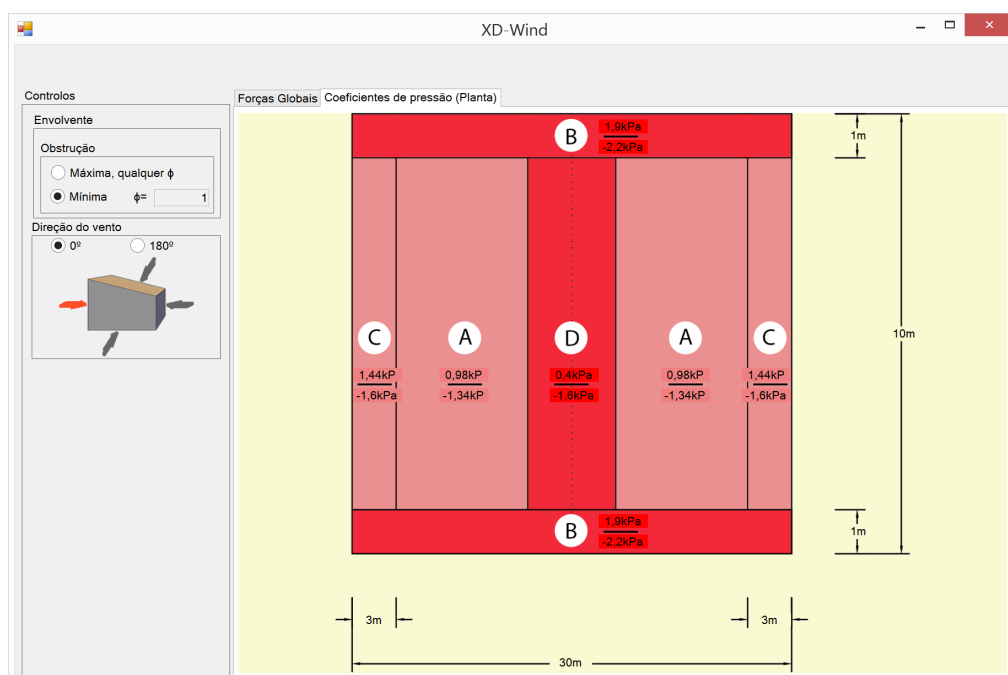


Figura 45 – Janela “Cobertura isolada com duas vertentes coeficientes de pressão” do XD-Wind

No separador coeficientes de pressão (Figura 45) são apresentados os valores mais gravosos para a pressão exercida sobre a cobertura, estas pressões servem para efeitos de dimensionamento dos elementos da cobertura ou ligações. As pressões com sinal positivo significam carregamento sobre a estrutura e as pressões com sinal negativo significam levantamento da estrutura.

Parede isolada

Após introduzir os parâmetros geométricos na janela “estruturas isoladas” os resultados são apresentados na janela “Parede isolada” (Figura 46).

Similarmente às janelas anteriores, o painel controlos permite interagir com a representação das cargas, neste caso permite adicionar panos perpendiculares nos bordos onde incide o vento e aplicar o factor de redução. Os valores das cargas são atualizados em tempo real (Figura 47).

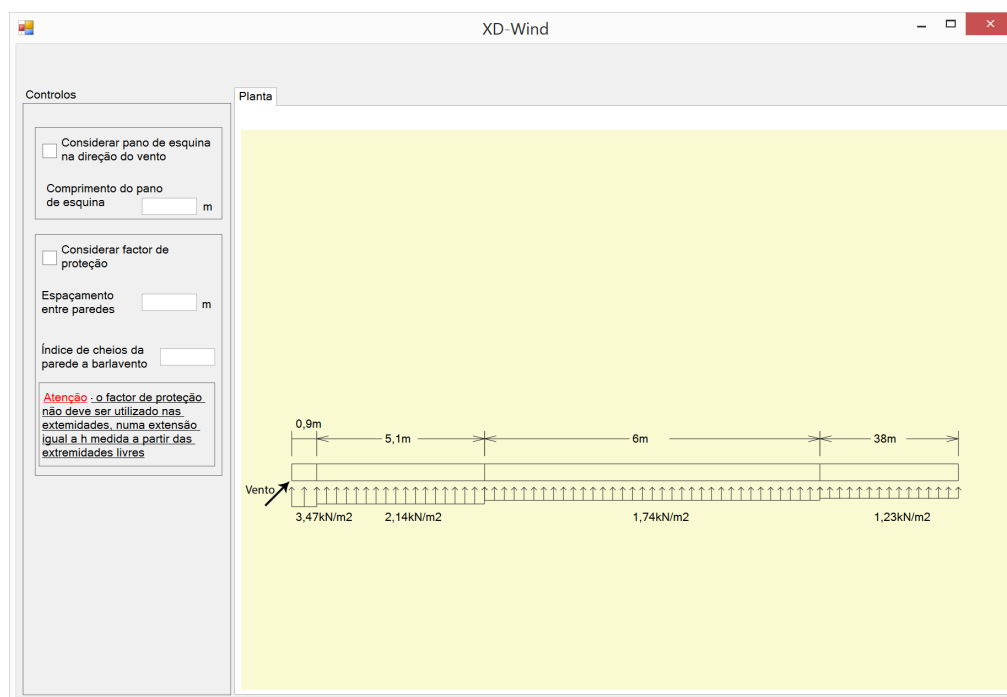


Figura 46 – Janela “Parede isolada” do XD-Wind

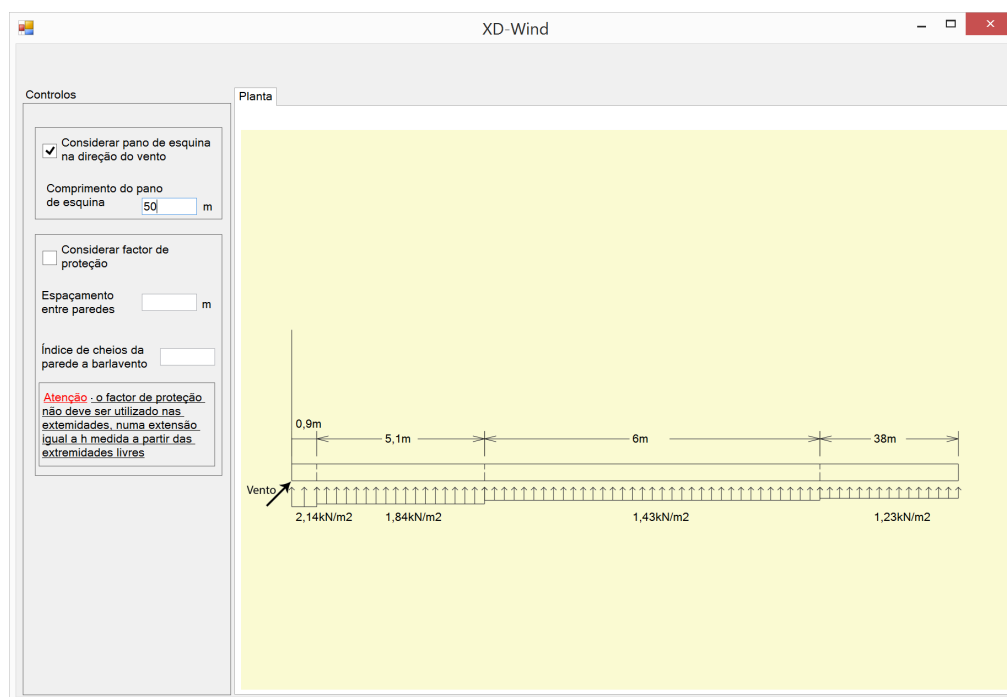


Figura 47 – Janela “Parede isolada com pano de esquina” do XD-Wind

Painéis de sinalização

Após introduzir os parâmetros geométricos na janela “estruturas isoladas” os resultados são apresentados na janela “Painéis de sinalização” (Figura 48).

Nesta janela não existem controlos.

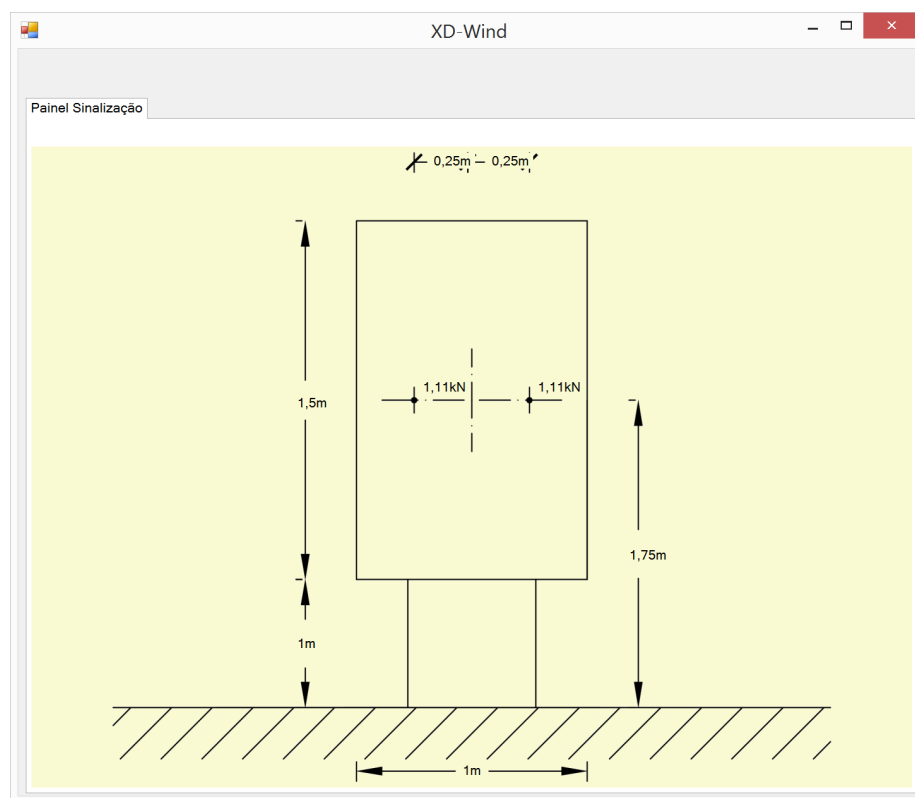


Figura 48 – Janela “Painel de sinalização” do XD-Wind

Os dois pontos no centro do sinal simbolizam forças horizontais de acordo com a direção do vento.

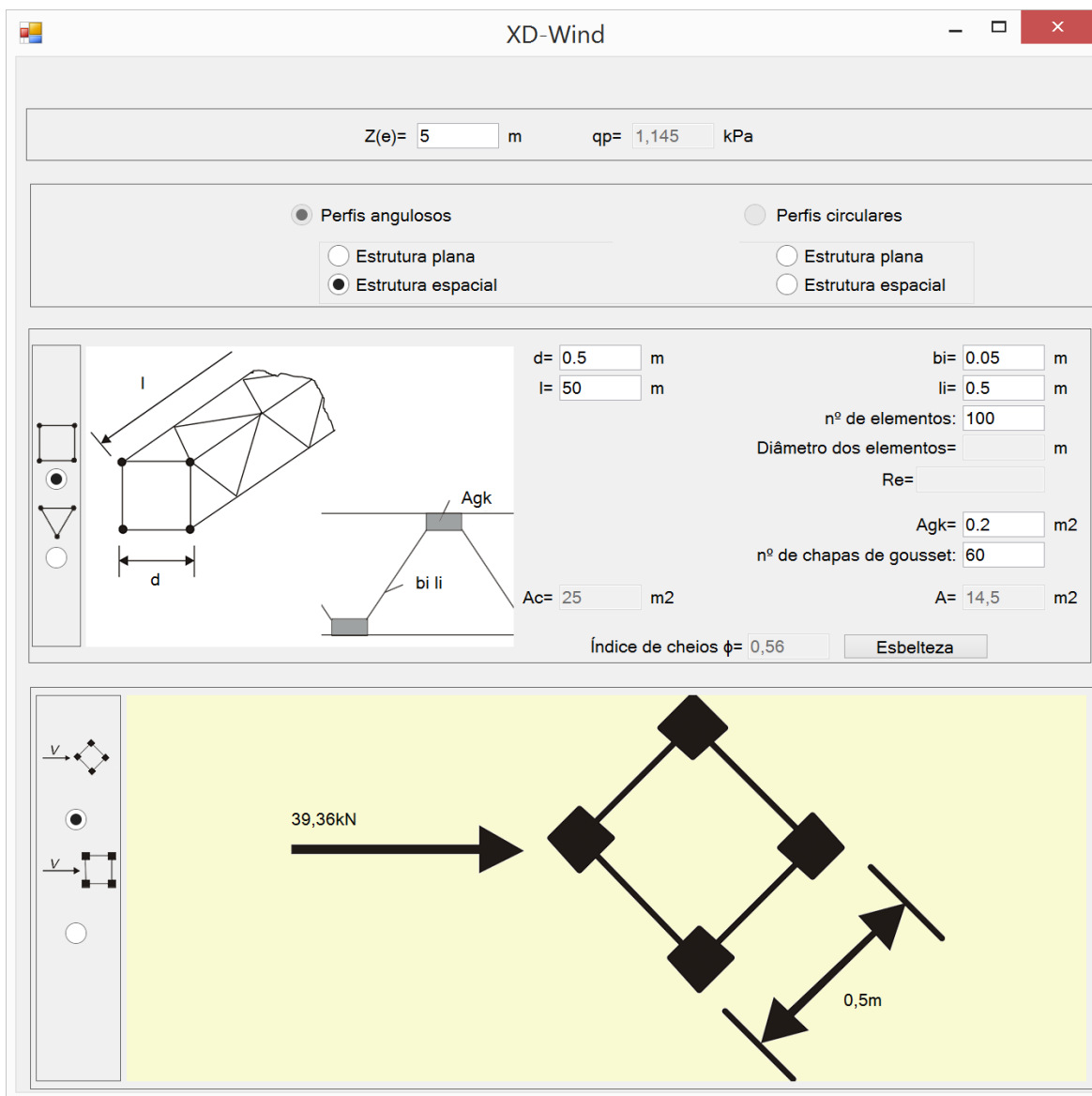
2.2.3. Elementos estruturais

Este módulo está sob desenvolvimento. Os dados matemáticos já foram recolhidos e as *forms* (janelas) e os respectivos comandos já foram criados, falta gerar a parte de código programático.

2.2.4. Estruturas treliçadas

Para estruturas treliçadas após selecionar o 4º botão da janela de Introdução há que definir a zona e a categoria do terreno.

Após esses passos pode definir-se as características da estrutura treliçada na janela “estruturas treliçadas” (Figura 49).



The screenshot shows the 'XD-Wind' software interface for the 'Estruturas treliçadas' (Truss Structures) window. The window is titled 'XD-Wind' and contains various input fields and a 3D model of a truss structure.

At the top, there are input fields for $Z(e) = 5$ m and $q_p = 1,145$ kPa.

Below these, there are two main sections for profile selection:

- Perfis angulosos** (Angular profiles):
 - ☐ Estrutura plana (Plan structure)
 - ☒ Estrutura espacial (Spatial structure)
- Perfis circulares** (Circular profiles):
 - ☐ Estrutura plana (Plan structure)
 - ☐ Estrutura espacial (Spatial structure)

Below the profile selection, there is a 3D model of a truss structure. To the right of the model, there are input fields for various parameters:

- $d = 0.5$ m
- $l = 50$ m
- $b_i = 0.05$ m
- $l_i = 0.5$ m
- nº de elementos: 100
- Diâmetro dos elementos: m
- Re=
- $Ag_k = 0.2$ m²
- nº de chapas de gousset: 60
- $A_c = 25$ m²
- $A = 14,5$ m²

At the bottom, there is a button labeled 'Índice de cheios $\phi = 0,56$ ' and a button labeled 'Esbelteza'.

Below the input fields, there is a 3D model of a truss structure. To the left of the model, there are two diagrams showing the wind direction and the resulting force. The force is labeled $39,36\text{kN}$. The model shows a truss structure with a wind direction indicated by an arrow. The resulting force is labeled $39,36\text{kN}$. The model also shows a distance of $0,5\text{m}$.

Figura 49 – Janela “Estruturas treliçadas” do XD-Wind

Nesta janela os parâmetros a introduzir são os da equação (37), isto é, as áreas da treliça. Assim que as duas áreas estiverem calculadas escolhe-se o caso de esbelteza (Figura 50), carregando no botão “esbelteza”.

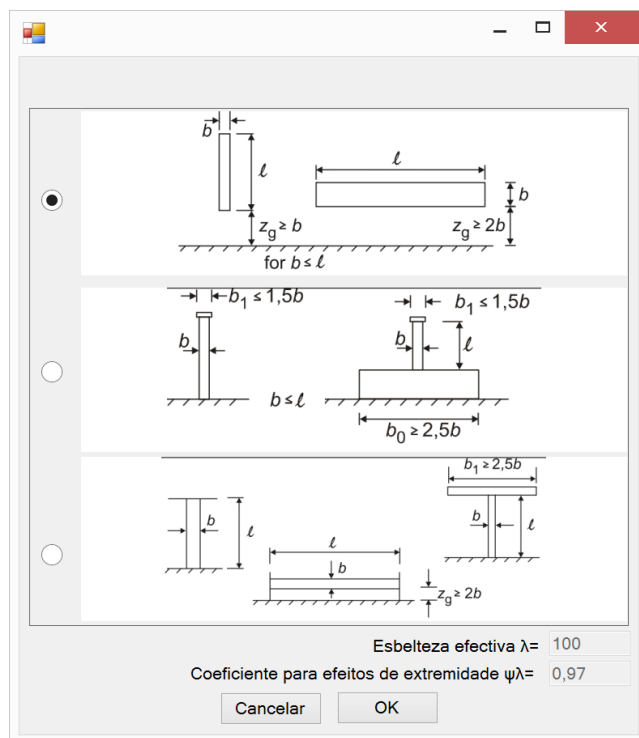


Figura 50 – Janela “Coeficiente de efeitos de extremidade” do XD-Wind

2.2.5. Bandeiras

Após seleção da zona e da categoria de terreno é apresentada a janela “bandeiras” (Figura 51).

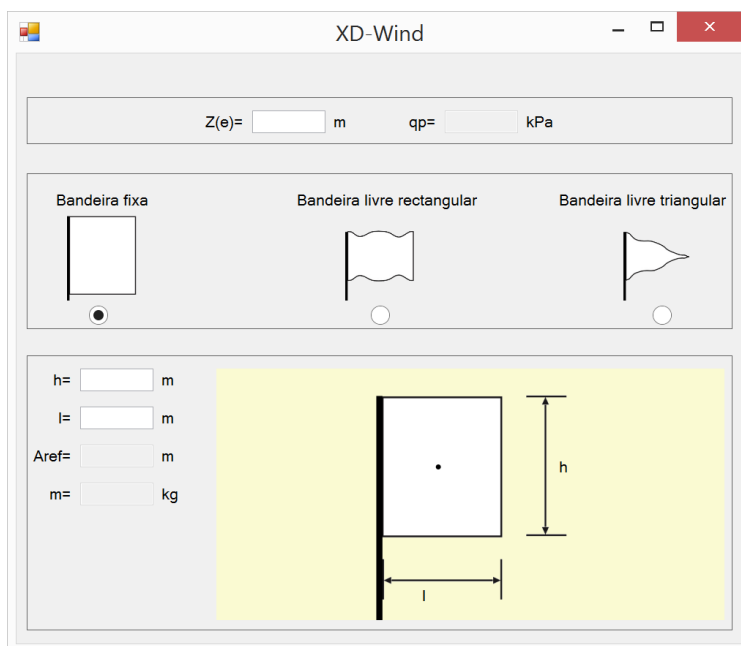


Figura 51 – Janela “Bandeiras” do XD-Wind

Nesta janela o utilizador terá que introduzir as dimensões da bandeira, a altura a que esta se encontra e caso a bandeira seja livre a massa em kg desta (Figura 52), o programa calculará os restantes parâmetros necessários para as equações da tabela 28.

The screenshot shows the 'XD-Wind' software window. At the top, there are input fields for 'Z(e)= 10 m' and 'qp= 1,322 kPa'. Below this, there are three radio button options for flag types: 'Bandeira fixa', 'Bandeira livre rectangular' (which is selected), and 'Bandeira livre triangular'. Each option has a corresponding icon. Below the radio buttons, there are input fields for 'h= 1 m', 'l= 2 m', 'Aref= 2 m', and 'm= 0.2 kg'. To the right of these fields is a large yellow rectangular area containing a diagram of a rectangular flag. The flag is attached to a vertical pole on the left. The flag's dimensions are indicated as 2m in width and 1m in height. A point on the flag is labeled '0,49kN', representing the wind action. The background of the diagram area is yellow.

Figura 52 – Ação do vento numa bandeira no programa XD-Wind

4. Considerações finais e desenvolvimentos futuros

4.1. Conclusões

Com este trabalho desenvolveu-se um software capaz de servir de ajuda a projetistas e estudantes que queiram quantificar a ação do vento para determinada estrutura.

Uma vez que não existe um software semelhante em território nacional os valores obtidos pelo software foram confrontados com cálculos manuais de modo a verificar a validade dos primeiros.

Conclui-se também que possivelmente as metas iniciais para esta dissertação fossem demasiado otimistas, pois apesar do programa estar funcional, não abrange a totalidade do Eurocódigo.

4.2. Desenvolvimentos futuros

Apesar do software estar funcional há coisas que devia fazer que atualmente não faz, entre elas as seguintes:

- Possibilidade de guardar ficheiros com os parâmetros definidos pelo utilizador para a sua estrutura;
- Inclusão de módulos que permitam o cálculo do coeficiente de orografia;
- Desenvolvimento de um novo método de mostrar os resultados em vez do atual “PictureBox+labels”;
- Vista em planta para coberturas em edifícios;
- Redação de um relatório para as estruturas calculadas.

O código fonte será disponibilizado caso haja interesse em alguém da Universidade de Aveiro continuar com a programação do XD-Wind.

5. Referências bibliográficas

- Aynsley, R M, W Melbourne, and B J Vickery. 1977. "Architectural Aerodynamics." London: Applied Science Publishers Ltd.
- Baker, C.J. 2007. "Wind engineering—Past, Present and Future." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95 (9-11): 843–70.
doi:10.1016/j.jweia.2007.01.011.
- Biezma, MV, and Frank Schanack. 2007. "Collapse of Steel Bridges." *Journal of Performance of Constructed ...*, no. October: 398–406.
- Cook, N J. 1990. *The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures: Static Structures*. Building Research Establishment Report. Building Research Establishment, Department of the Environment.
- Cook, Nicholas. 2007. *Designers' Guide to EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on Structures, General Actions: Part 1-4: Wind Actions*. Thomas Telford.
- Eaton, Keith John, and J R Mayne. 1975. "The Measurement of Wind Pressures on Two-Storey Houses at Aylesbury." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1. Elsevier: 67–109.
- Kafai, Yasmin B, and Quinn Burke. 2013. "The Social Turn in K-12 Programming : Moving from Computational Thinking to Computational Participation." *Proceedings of the 44th ACM Technical Symposium on Computer Science Education - SIGCSE '13*, 603–8. doi:10.1145/2445196.2445373.
- LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2010. "Eurocódigo 1. Ações Em Estruturas. Ações Gerais. Ações Do Vento."
- Meroney, R N. 1999. "Perspectives on Air Pollution Aerodynamics." In *10th International Wind Engineering Conference, Copenhagen, Denmark*.
- Riera, J D, and A G Davenport. 1998. "Wind Effects on Buildings and Structures." *Rotterdam: AA Balkema*.
- Sharma, Chetan. 2010. "Sizing Up The Global Mobile Apps Market." *Report, Chetan Sharma Consulting, Issaquah, WA*. http://telecomcircle.com/wp-content/uploads/2009/05/Sizing_up_the_Global_Mobile_Apps_Market.pdf.

<http://www.ingegneri.info/software/wind-ec1-rev-a-141.html>

Última data de visita: 25 de Novembro de 2014

<http://www.er-ef.net/opterecenja.html>

Última data de visita: 25 de Novembro de 2014

<http://www.yourspreadsheets.co.uk/wind-on-structures-analysis-to-ec-1.html>

Última data de visita: 25 de Novembro de 2014

<http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/steel-solutions.html>

Última data de visita: 25 de Novembro de 2014

<http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015

<https://www.gimp.org/>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015

<http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015

<https://plot.ly/>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015

<http://www.codeproject.com/Articles/15743/Pan-and-Zoom-Very-Large-Images>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015

<http://civilxd.web.ua.pt/>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015

<http://www.acessibilidade.gov.pt/accessmonitor/dir/see/?cD0xNnxvPWF8cz0zMTN8dj1wYWdl>

Última data de visita: 09 de Dezembro de 2015